

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektroenergetiky

Současné možnosti akumulace energie

Current possibilities of the energy storage

Zadání bakalářské práce

Student:

Lukáš Malyrz

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Současné možnosti akumulace energie
Current possibilities of the energy storage

Zásady pro vypracování:

1. Základní pojmy z oblasti akumulace energie
2. Rozdělení akumulčních systémů dle principu a použité technologie
3. Srovnání jednotlivých systémů akumulace dle technických i ekonomických kritérií
4. Akumulační systém vhodný pro spojení s fotovoltaickou elektrárnou

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Cenek, M.: Akumulátory od principu k praxi, FCC Public.
2. Barin, A. and col.: Multiple Criteria Analysis for Energy Storage Selection, Journal of Energy and Power Engineering, 2011.
3. Chválek, R.: Palivové články pro akumulaci elektrické energie, diplomová práce, Ostrava, 2008.
4. Bartoš, V.: Obnovitelné zdroje energií, Grada Publishing, Praha, 2010.
5. Libra, M., Poulek, V.: Fotovoltaika – Teorie i praxe využití solární energie, Vydavatelství ILSA, 2009.
6. Murtinger, K., Beranovský, J., Tomeš, M.: Fotovoltaika - elektřina ze slunce, Vydavatelství ERA, 2007.
7. Nieslaník, T.: Analýza kvality napětí z obnovitelných zdrojů, Bak.práce, Ostrava, 2010.
8. www stránky ESA: <http://www.electricitystorage.org/site/technologies/>
9. www stránky PROATOM: <http://proatom.luksoft.cz/view.php?cislocianku=2008050001>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Moldřík, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 4.5. 2012

Podpis..... Malý

Poděkování:

Především děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, kterým byl Ing. Petr Moldřík, Ph.D., za vhodnou metodickou a odbornou pomoc při zpracování této bakalářské práce a za poskytnutí nezbytných dat.

Abstrakt:

Hlavním cílem této bakalářské práce je zvážit možnosti akumulace elektrické energie. Podnětem se tedy stává otázka, jak nejhospodárněji dle možných podmínek uložit přebytečnou energii v době přebytku a jak v době potřeby danou energii nejlépe využít.

Práce je rozdělena do několika částí. První část seznamuje se základními pojmy týkajícími se mechanických a elektrochemických akumulátorů. Následující část pojednává o rozdělení akumulátorů podle principu funkce, využití, technologie a zároveň poskytuje základní přehled vlastností, výhod a nevýhod jednotlivých akumulačních systémů. V hlavní části je proveden výběr vhodného akumulátoru pomocí metody párového porovnání AHP. Záměrem se stává navržení vhodného akumulátoru pro alternativní zdroj elektrické energie, jímž je v této práci fotovoltaická elektrárna. V další části práce je provedena analýza konkrétní oblasti vlivu fotovoltaické elektrárny na síť a na základě těchto informací je navržena energie akumulátoru. Obsahem závěru je shrnutí všech poznatků.

Abstract:

The main goal of this bachelor thesis is to consider the possibility of accumulation of electric power. The suggestion is the question how to accumulate efficiently superfluous power during excess period in accordance with possible conditions, and how to use energy accumulated the best way when necessary.

The work is divided into several parts. The first part introduces the basic concepts concerning mechanical and electrochemical batteries. The following part deals with the categorization of batteries according to the principle of function, use, and technology, and also provides a basic overview of features, advantages, and disadvantages of individual accumulation systems. The main part includes selection of an appropriate battery using the AHP paired comparison. The aim is to design a suitable battery for alternative electric power source, which is photovoltaic power in this work. The next section contains an analysis of the specific area of photovoltaic power influence; on the basis of this information the energy of the accumulator is designed. The content of the conclusion includes summary of all the pieces of knowledge.

Klíčová slova:

Akumulace, Energie, Akumulátor, Baterie, Multikriteriální, AHP, Solární energie

Key word:

Accumulation, Energy, Accumulator, Battery, Multicriteria, AHP, Solar energy

Seznam použitých symbolů:

U	Napětí	[V]
E	Energie	[J]
E_p	Potenciální energie	[J]
E_k	Kinetická energie	[J]
E_L	Energie cívky	[J]
E_C	Energie kondenzátoru	[J]
E_t	Teoretický energetický ekvivalent	[W·h]
E_s	Skutečný energetický ekvivalent	[W·h]
E_A	Energie akumulátoru	[W·h]
E_d	Dodaná energie	[W·h]
E_{od}	Odebraná energie	[W·h]
P_A	Výkon akumulátoru	[W]
m	Hmotnost	[kg]
g	Gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
h	Výška	[m]
v	Rychlost	[m·s ⁻¹]
V_u	Užitný objem	[m ³]
H_{str}	Střední výška	[m]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
η	Účinnost	[-]
$\eta_{\%}$	Účinnost	[%]
η_{me}	Měrná energie akumulátoru	[Wh·kg ⁻¹]
η_{mp}	Měrný výkon akumulátoru	[W·kg ⁻¹]
t_{\S}	Doba špičkového provozu	[h]
P_i	Instalovaný výkon	[W]
L	Indukčnost cívky	[H]
I	Proud	[A]
C	Kapacita kondenzátoru	[F]
T_c	Kritická teplota	[K]
J	Moment setrvačnosti	[kg·m ²]
ω	Úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]
dP_{15min}	Rozdíl výkonu během 15 minut	[%]
PI_t	Míra dlouhodobého flikru	[-]
v_i	Váha i-tého kritéria	[-]
v_j	Váha j-tého kritéria	[-]
w_i	Hodnocení kritéria	[-]
N	Počet porovnávaných dvojic	[-]
n_i	Počet preferencí	[-]
G_i	Normalizované kritérium	[-]
S	Matice párového porovnání kritérií	[-]
U	Matice párového porovnání variant	[-]
s_{ij}	Prvek matice S	[-]
u_{ij}	Prvek matice U	[-]
L_k	Množina	[-]
f_i	Kritérium	[-]

I_s	Konzistence matice S	[-]
x	Vlastní vektor matice S	[-]

Seznam použitých zkratk:

SMES	Supravodivý akumulátor (Superconducting Magnetic Energy Storage)
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
CEAS	Systém stlačený vzduch (Compressed Air Energy Storage)
AGM	(Absorbed Glass Mat)
VRB	Vanadium redoxní baterie (Vanadium Redox Battery)
PSB	(Polysulfide Bromide)
AFC	Palivové články s alkalickým elektrolytem (Alkaline Fuel Cell)
PEMFC	Palivové články s polymerní membránou (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)
DMFC	Metanolové palivové články (Direct Methanol Fuel Cells)
PAFC	Palivové články s kyselinou fosforečnou (Phosphoric Acid Fuel Cell)
MCFC	Palivové články s tavenými uhličitany (Molten Carbonate Fuel Cell)
SOFC	Palivové články s tuhými oxidy (Solid Oxide Fuel Cell)
EDLC	Dvouvrstvé kondenzátory (Electric Double-Layer Capacitor)
MFC	Vícevláknové vodiče (Multi Filamentary Composite)
CCC	Vodiče s povlakem (Coated Conductor Composite)
SMES	Supravodivé akumulátory (Superconductive Magnetic Energy Storage)
GFRP	Skelná vlákna (Glass Fibre Reinforced Polymers)
CFRP	Uhlíkové vlákna (Carbon Fibre-Reinforced Plastic)
UPS	Nepřerušitelný zdroj energie (Uninterruptible Power Supply)
FVE	Fotovoltaická elektrárna
AHP	Analytický hierarchický proces (Analytic Hierarchy Process)
EC	(Expert Choice)

Obsah

1.	Úvod	- 1 -
2.	Základní pojmy akumulačních systémů	- 2 -
2.1	Základní pojmy elektrochemických akumulátorů	- 2 -
2.2	Základní pojmy mechanických akumulátorů	- 5 -
2.2.1	Základní pojmy přečerpávacích elektráren	- 5 -
2.2.2	Základní pojmy pro setrvačník	- 6 -
2.3	Základní pojmy elektrostatických a elektromagnetických akumulátorů	- 6 -
3.	Elektrochemické akumulátory	- 8 -
3.1	Primární články	- 9 -
3.1.1	Základní rozdělení primárních článků	- 9 -
3.2	Sekundární články	- 10 -
3.2.1	Kyselé akumulátory	- 10 -
3.2.2	Alkalické akumulátory	- 12 -
3.2.3	Akumulátory s bezvodým elektrolytem	- 13 -
3.2.4	Akumulátory Kov-vzduch	- 16 -
3.2.5	Vysokoteplotní akumulátory s pevným elektrolytem	- 19 -
3.3	Průtočné články	- 21 -
3.4	Palivové články	- 23 -
4.	Elektrostatické, elektromagnetické akumulátory a superkapacitory	- 26 -
4.1	Kondenzátory a superkapacitory jako akumulační systémy	- 26 -
4.2	Elektromagnetický akumulátor (SMES)	- 29 -
5.	Mechanické akumulátory	- 31 -
5.1	Přečerpávací elektrárny (PVE)	- 31 -
5.2	Systém stlačený vzduch (CEAS)	- 32 -
5.3	Setrvačník	- 32 -
6.	Metody multikriteriálního rozhodování	- 34 -
6.1	Metody výpočtu vah kritérií	- 34 -
6.1.1	Metody založeny na skalarizaci ordinální informace	- 35 -
6.1.2	Metody založeny na kardinální informaci	- 39 -
7.	Princip AHP	- 40 -
7.1	Postup výpočtu	- 40 -
7.2	Seznámení se softwarovým produktem Expert Choice (EC)	- 41 -
8.	Stanovení optimálního akumulátoru pro solární systém pomocí EC	- 42 -
8.1	Návrh porovnávaných variant akumulátorů	- 42 -
8.2	Preference kritérií	- 43 -
8.3	Výsledné hodnocení dle EC	- 45 -
9.	Návrh akumulačního systému pro FVE	- 46 -
9.1	Hodnocení kvality sítě s FVE 40 kWp dle ČSN EN 50160	- 46 -

9.1.1	Odchyly napětí.....	- 46 -
9.1.2	Harmonické zkreslení napětí	- 47 -
9.1.3	Dlouhodobý flikr PIt.....	- 47 -
9.1.4	Rychlé změny napětí	- 48 -
9.1.5	Frekvence	- 48 -
9.1.6	Nesymetrie napětí.....	- 48 -
9.2	Výkonové poměry FVE pro danou lokalitu bez akumulace.....	- 49 -
9.3	Návrh akumulátoru pro energetickou akumulaci FVE 40 kWp	- 50 -
9.3.1	Stanovení energie akumulátoru dle ideálního průběhu výkonu	- 50 -
9.3.2	Průběhy výkonu a energie akumulátoru v běžném provozu.....	- 53 -
9.3.3	Návrh akumulačního systému z nabídky trhu	- 56 -
10.	Závěr.....	- 57 -

Seznam obrázků

Obr. 3-1 Základní dělení elektrochemických akumulátorů	- 8 -
Obr. 3-2 Dělení primárních článků podle materiálu anody	- 9 -
Obr. 3-3 Konstrukční řešení PB akumulátoru s elektrodami ve tvaru svítků a mřížových desek [8] ..	- 10 -
Obr. 3-4 Princip Li-ion (LiNiO_2) článku [12]	- 14 -
Obr. 3-5 Možné varianty článku Li-vzduch [18]	- 17 -
Obr. 3-6 Konstrukční uspořádání akumulátoru Na-S [19]	- 19 -
Obr. 3-7 Konstrukční uspořádání akumulátoru Na-NiCl_2 [20]	- 20 -
Obr. 3-8 Uspořádání systému VRB [21]	- 22 -
Obr. 3-9 Princip palivového článku PEMFC [4]	- 23 -
Obr. 4-1 Náhradní schéma EDLC[23]	- 27 -
Obr. 4-2 Princip EDLC kondenzátoru	- 27 -
Obr. 4-3 Princip uložení náboje a náhradní schéma superkapacitoru [23]	- 28 -
Obr. 4-4 Principiální návrh supravodivé cívky 360 MJ (Toroid) [3]	- 29 -
Obr. 5-1 Principiální schéma setrvačnicku [21]	- 33 -
Obr. 6-1 Fullerův trojúhelník	- 35 -
Obr. 7-1 Zobrazení hierarchie metody AHP	- 40 -
Obr. 8-1 Zobrazení vah kritérií dle EC	- 44 -
Obr. 8-2 Výsledné hodnocení dle EC	- 45 -
Obr. 9-1 Vyrobená elektrická energie pro jednotlivé dny sledovaného období	- 49 -
Obr. 9-2 Průměrný dodávaný výkon FVE	- 49 -
Obr. 9-3 Blokové schéma PVE s akumulací	- 50 -
Obr. 9-4 Denní diagram zatížení 3.5.2011 [28]	- 51 -
Obr. 9-5 Simulace dodávaného výkonu FVE 40 kWp s akumulací 25. 5. 2011	- 51 -
Obr. 9-6 Změna výkonu $\text{dP}_{15\text{min}}$ pro ideální průběh	- 52 -
Obr. 9-7 Simulace dodávaného výkonu FVE 40 kWp s akumulací 23. 5. 2011	- 54 -
Obr. 9-8 Změna výkonu $\text{dP}_{15\text{min}}$ pro slunečný den s mírnou oblačností	- 54 -
Obr. 9-9 Simulace dodávaného výkonu FVE 40 kWp s akumulací 13. 6. 2011	- 55 -

Seznam tabulek

Tab. 3-1 Základní vlastnosti AGM akumulátoru [8], [9]	- 11 -
Tab. 3-2 Vlastnosti článku na bázi zinku [5], [11]	- 13 -
Tab. 3-3 Materiály využívané v Li-ion [14], [15]	- 15 -
Tab. 3-4 Základní vlastnosti Li-ion [14]	- 15 -
Tab. 3-5 Vlastnosti článku kov-vzduch [18]	- 19 -
Tab. 3-6 Vlastnosti akumulátorů Na-S a Na-NiCl ₂ [19], [20], [12]	- 21 -
Tab. 3-7 Základní redoxní páry průtočných baterií [22]	- 21 -
Tab. 3-8 Základní vlastnosti průtočných baterií [22]	- 23 -
Tab. 3-9 Vlastnosti a rozdělení palivových článků [4]	- 24 -
Tab. 4-1 Porovnání vlastností akumulátorů a kondenzátorů [24]	- 28 -
Tab. 5-1 PVE v ČR [27]	- 31 -
Tab. 6-1 Hodnocení kritérií dle Saatyho	- 36 -
Tab. 8-1 Vlastnosti srovnávaných akumulátorů [9], [12], [21], [29],	- 42 -
Tab. 8-2 Dělení kritérií dle funkce	- 42 -
Tab. 8-3 Váha variant po normalizaci	- 43 -
Tab. 8-4 Zobrazení Saatyho matice S pro zvolená kritéria	- 43 -
Tab. 8-5 Popis kritérií	- 44 -
Tab. 9-1 Parametry FVE	- 46 -
Tab. 9-2 Extrémy napětí	- 46 -
Tab. 9-3 Extrémy THD U	- 47 -
Tab. 9-4 Extrémy Flickr PIt	- 47 -
Tab. 9-5 Rychlé změny napětí	- 48 -
Tab. 9-6 Hodnoty frekvence	- 48 -
Tab. 9-7 Parametry FVE	- 49 -
Tab. 9-8 Vlastnosti akumulátoru pro energetickou akumulaci	- 52 -
Tab. 9-9 Parametry dodávaného výkonu s akumulací pro 23. 5. 2011	- 53 -
Tab. 9-10 Parametry dodávaného výkonu s akumulací pro 13. 6. 2011	- 55 -
Tab. 9-11 Akumulátory LiFeYPO ₄ dostupné na trhu [29]	- 56 -

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je zvážit možnosti akumulace elektrické energie a zároveň poskytnout informace o možném trendu ve vývoji akumulčních systémů. Elektrická energie je z hlediska spotřebitele nejlépe využitelná a lze konstatovat, že člověk je na tomto druhu energie zcela závislý. Dá se říci, že samotnou elektrickou energii skladovat ve větším množství prozatím nelze, můžeme ji pouze transformovat na jiný druh energie jako např. elektrochemickou nebo mechanickou a reverzibilně ji s určitou ztrátou zpětně získat. Dnešní trend se také zabývá skladováním elektrického náboje ve velkokapacitních kondenzátorech nebo elektromagnetického pole supravodivých cívek, ale prozatím jsou tyto způsoby akumulace předmětem vývoje.

Pro orientaci v akumulčních systémech je potřeba získat ucelený přehled parametrů, které s akumulací souvisí. Z tohoto důvodu je součástí první části práce seznámení se základními pojmy. Ty jsou rozděleny podle principu uložení energie.

Nejrůznějších akumulátorů je nepřeberné množství, čili součástí práce není pouze rozdělení dle principu, ale snahou je rozčlenit akumulční systémy dle použité technologie, případně konstrukčního uspořádání. Této problematice přísluší druhá část práce. Největší důraz je kladen na elektrochemické akumulátory, jelikož se zde vývoj rozvíjí nejrychleji. V práci jsou uvedeny pouze typy akumulátorů, které jsou již známy a využívány nebo je jejich vývoj ve stádiu před uvedením do provozu.

Velké množství typů akumulátorů s různými vlastnostmi s sebou přináší problém, jak vybrat správný akumulátor pro konkrétní aplikaci. Nabízí se zde využití metod, založených na matematických vztazích umožňující číselného vyjádření. V práci je využita metoda AHP pro výběr vhodného akumulátoru ve spojení s FVE.

Akumulace je rozdělena na dvě základní odvětví. První řeší uskladnění elektrické energie mobilních zařízení. Zde je hlavním cílem dosáhnout vysoké koncentrace energie vztažmo k hmotnosti a objemu. Druhé odvětví řeší akumulaci velkých objemů energie související převážně s energetikou. V energetice má akumulování elektrické energie velký význam, jelikož s rostoucí spotřebou, čili i výrobou, nastává problémový faktor související s kolísajícím odběrem v závislosti na nepříliš snadné regulaci velkých elektráren. Stejný efekt přináší rozvoj alternativních metod výroby elektrické energie, kde je výroba závislá na nestálých parametrech jako např. rychlosti větru u větrných elektráren nebo slunečním svitu u solárních panelů.

V poslední části práce je pozorován vliv konkrétní FVE na síť a na základě simulací je navržen vhodný akumulátor pro eliminaci zpětných vlivů.

2. Základní pojmy akumulčních systémů

Akumulátor

Všeobecně lze nazvat pojmem akumulátor všechna zařízení, která jsou schopná nějakým způsobem shromažďovat, případně uchovávat určitý druh energie a zpětně ji v potřebném okamžiku odevzdat. Akumulátory můžeme rozdělit podle způsobu uchovávání energie do několika základních skupin.

- elektrochemické
- mechanické
- elektromagnetické
- elektrostatické
- tepelné

Účinnost akumulátoru

Účinnost akumulátoru vyjadřuje podíl dodané energie E_d a odebrané energie E_{od} (2.1). Procentuálně pak můžeme účinnost zapsat vztahem (2.2).

$$\eta = \frac{E_d}{E_{od}} \quad (2.1)$$

$$\eta_{\%} = \frac{E_d}{E_{od}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Životnost

Životnost udává schopnost zařízení plnit svou funkci po dobu efektivního využití.

2.1 Základní pojmy elektrochemických akumulátorů

Obecně řečeno elektrochemické akumulátory jsou zařízení, kde se aktivní materiál přímou přeměnou pomocí chemické reakce mění na energii elektrickou. Jedná se o zdroj stejnosměrného proudu, což zapříčiňuje elektrochemická reakce při vybíjení daného elektrochemického zdroje.

Baterie

Baterii můžeme nazvat soupravou několika paralelně, sériově, popřípadě sérioparalelně zapojených článků. [6]

Elektrochemický článek

Elektrochemický (galvanický) článek představuje vodivé spojení dvou různých elektrochemických poločlánků. Poločlánek je tvořen kovem vloženým do roztoku obsahující ionty tohoto kovu. Koncepce článku může být různá. Obecně článek představuje elektrochemický zdroj, jehož energie je odebírána na základě elektrochemické reakce. [6]

Elektrolyt

Elektrolyt představuje roztok nebo taveninu vedoucí elektrický proud prostřednictvím iontů. Elektrolytem může být kyselina, zásada nebo sůl. Může se vyskytovat v kapalném i pevném skupenství. [7]

Elektroda

Elektroda je součást heterogenního systému skládajícího se minimálně ze dvou fází, z nichž je jedna tvořena vodičem 1. třídy, druhou tvoří vodič 2. třídy. Většinou se elektrodou nazývá část s vodičem 1. třídy. Mohou to být látky pevné, kapalné i plynné. Podle reakce vzniklé na dané elektrodě je dělíme na anodu a katodu. Na anodě dochází k oxidaci aktivní látky, na katodě je aktivní látka redukována. U akumulátoru není toto označení jednoznačné, jelikož nabíjení a vybíjení akumulátoru představuje inverzní děj, což vede k faktu, že elektroda považována při nabíjení za katodu je při vybíjení anodou. Z tohoto důvodů se u akumulátoru běžně používá výraz kladná a záporná elektroda. [7]

Měrná energie

Měrná energie vyjadřuje podíl celkové energie E_A a hmotnosti akumulátoru m .

$$\eta_{me} = \frac{E_A}{m} \quad (2.3)$$

Měrný výkon

Měrný výkon chápeme jako podíl možného odebíraného výkonu P_A a hmotnosti akumulátoru m .

$$\eta_{mp} = \frac{P_A}{m} \quad (2.4)$$

Kapacita akumulátoru

Pojem kapacita akumulátoru nám udává, kolik energie může akumulátor popř. baterie uskladnit za stanovených podmínek. U akumulátoru se kapacita standardně udává v Ah. Toto označení není pro porovnání rozdílných typů akumulátorů zcela přesné, jelikož záleží na napěťovém potenciálu článku. Z tohoto důvodu je zaveden pojem měrná kapacita. Pojem kapacita lze rozdělit na dvě části a to na jmenovitou a skutečnou kapacitu. [5]

- **Jmenovitá kapacita akumulátoru** - představuje množství elektrického náboje při vybíjení režimem C5, C20 nebo jiném. Jinými slovy konkrétně pro Ni-Cd nebo Ni-MH akumulátorový článek v režimu vybíjení C5 platí, jaké množství náboje je samostatný článek schopen dodat při 5. hodinovém vybíjení do konečného napětí 1 V. Podmínkou je teplota + 20 °C pro nabíjení, skladování a vybíjení. Obdobně tento postup platí i pro označení C20 popřípadě jiném označení. Pro konkrétní typ akumulátoru je daný režim zjišťování kapacity normalizován. [5]
- **Skutečná kapacita akumulátoru** – je závislá na okolních vlivech ovlivňující daný akumulátor. Nejvíce tento stav ovlivňuje vybíjecí proud a teplota. [5]

Vnitřní odpor

Vnitřní odpor akumulátoru je údaj, který informuje o možném zatížení akumulátoru proudem. Podle této veličiny se dá porovnáním z výchozího stavu určit aktuální stav opotřebení akumulátoru. S rostoucím vnitřním odporem klesá možné zatížení akumulátoru proudem, což je nežádoucí jev. Vnitřní odpor primárního článku se v průběhu vybíjení mění, kdežto u sekundárního článku tento parametr zůstává v pracovní části charakteristiky konstantní. [5]

Paměťový efekt

Tento jev je známy převážně u Ni-Cd a Ni-MH akumulátorů. Vzniká vlivem neúplného vybití a posléze nabití akumulátoru. Nelze striktně říci, že se jedná o snížení kapacity daného článku, jelikož kapacita se tímto jevem příliš neovlivní. Hlavním nedluhem se stává pokles napětí při zatížení akumulátoru konstantním proudem. V místě, kde je pomyslný bod paměti akumulátoru, prudce poklesne napětí článku. Pro danou situaci se jedná již o vybitý akumulátor. Pokud se zatíží článek nižší hodnotou proudu, lze dosáhnout hlubšího vybití. Částečně lze tento jev eliminovat několika cykly úplného vybití článku tzv. formátováním. [5]

Samovybíjení

Nepříjemnou vlastností provázející všechny elektrochemické akumulátory je samovybíjení. Běžně se pohybuje v rozsahu 1 – 30 % kapacity akumulátoru za měsíc. Tento jev je závislý na teplotě okolí, vlhkosti, typu a stáří daného elektrochemického článku. Podle hodnoty samovybíjení lze určit, zda se akumulátor dá aplikovat pro aplikace vyžadující časté cykly, nebo zdali je potřeba energii akumulovat na delší dobu. [5]

Napětí článku

Napětí článku udává, jaký elektrický potenciál nám daný článek je schopen poskytnout. Jednotkou napětí je V (Volt). Potenciál napětí článku lze vyjádřit pomocí jmenovitého napětí nebo tzv. skutečného napětí.

- **Jmenovité napětí** – zpravidla představuje střední hodnotu elektrického potenciálu článku. Norma pak udává pro konkrétní typ článku danou hodnotu, která musí být splněna.
- **Skutečné napětí** – představuje napětí článku v závislosti na okolních vlivech, jako je např. teplota, tlak, vlhkost atd. a momentální stav článku (stupeň vybití, opotřebení). [5]

2.2 Základní pojmy mechanických akumulátorů

Kinetická a potenciální energie

Kinetická, jinak řečeno pohybová energie, představuje energii pohybujícího se tělesa vztahmo k dané soustavě. Aby těleso získalo pohybovou energii, je potřeba vykonat určitou práci. Pohybovou energii tělesa lze vyjádřit vztahem (2.5).

Potenciální energie vyjadřuje, jakou práci je potřeba vykonat pro vyzvednutí daného tělesa o hmotnosti **m** do výšky **h** v homogenním tíhovém poli země **g**. Lze vyjádřit pomocí vztahu (2.6).

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.5)$$

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (2.6)$$

2.2.1 Základní pojmy přečerpávacích elektráren

Užitný objem

Užitný objem určuje využitelný objem vodní nádrže. Zpravidla se označuje V_u .

Energetický ekvivalent

Energetický ekvivalent vyjadřuje potenciální energii užitného objemu vodní nádrže.

Teoretický energetický ekvivalent (bez uvažování ztrát)

$$E_t = \frac{g \cdot \rho \cdot H_{str} \cdot V_u}{3600} \quad (2.7)$$

Skutečný energetický ekvivalent (včetně ztrát)

$$E_s = \frac{g \cdot \rho \cdot H_{str} \cdot V_u \cdot \eta_e}{3600} \quad (2.8)$$

g - gravitační zrychlení, ρ - hustota, H_{str} - střední výška, V_u - užitný objem, η_e - celková účinnost elektrárny

2.2.2 Základní pojmy pro setrvačnick

Energie setrvačnicku

Energie setrvačnicku je přímo úměrná momentu setrvačnosti J a kvadrátu úhlové rychlosti ω .

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (2.9)$$

2.3 Základní pojmy elektrostatických a elektromagnetických akumulátorů

Energie cívky

Energie je dána indukčností cívky L protékané proudem I , kde energie roste přímo úměrně s indukčností a s kvadrátem protékaného proudu (2.10).

$$E_L = \frac{1}{2} L I^2 \quad (2.10)$$

L - indukčnost cívky, I - proud protékající vodičem

Supravodivost

Supravodivost představuje jev, při kterém materiál neklade průchodu proudu měřitelný odpor a zároveň je ideálním diamagnetikem. Jedná se o anomálii tykající se především materiálů s průměrnou až horší vodivostí v běžném stavu. Pro ušlechtilé kovy je supravodivost nedocílitelná. Podmínkou docílení supravodivosti je dosažení chlazením kritické teploty.

Energie kondenzátorů

Energie, kterou je kondenzátor schopen uchovat, je vyjádřena vztahem (2.11). Ze vztahu je patrné, že energie je přímo úměrná kapacitě a roste s kvadrátem napětí.

$$E_c = \frac{1}{2} CU^2 \quad (2.11)$$

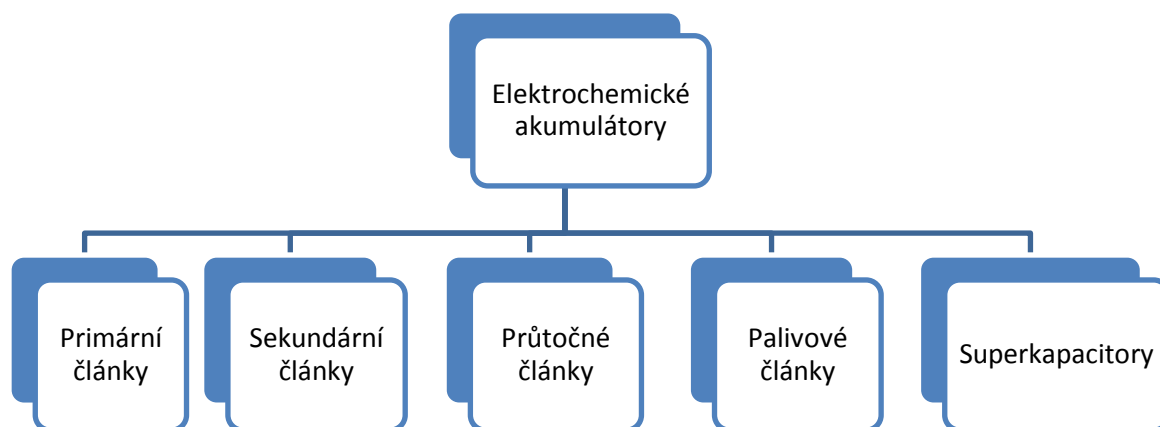
Dielektrikum

Dielektrikem se označují látky elektricky nevodivé, schopny vlivem vnějšího magnetického pole orientovat své dipóly (polarizovat se) a působit polem opačným. Polarizace je možná pouze u polárních dielektrik vyznačujících se nesymetrickým uspořádáním náboje v molekulách. Polarizace může být elektronová (dochází k posuvu elektronů vůči jádru), iontová (posuvem iontů vůči sobě) a orientační polarizace (posuvem dipólů polárních skupin nebo molekul ve směru elektrického pole).
[10]

3. Elektrochemické akumulátory

Znakem elektrochemických akumulačních systémů je princip uložení elektrické energie, ta je uložena v chemické vazbě a lze ji zpětně získat pomocí chemické redoxní reakce. Vlivem oxidace daný prvek nebo sloučenina zvyšuje oxidační číslo a ztrácí elektron, opačný děj nastává při redukci.

Elektrochemické akumulátory můžeme rozdělit z hlediska principu do tří základních skupin a to na články primární, sekundární a palivové. Primární články lze specifikovat omezeným množstvím reaktantu, tedy pokud chemická reakce odezní nebo dojde k nasycení elektrolytu, nelze již daný článek regenerovat elektrickým proudem. Sekundární články také obsahují pouze omezené množství reaktantu, ale můžeme je použít reverzibilně, vrátit do původního stavu. Dalším typem článků jsou tzv. palivové články. Palivový článek pracuje na podobném principu jako akumulátor, pouze neobsahuje vnitřní zásobník paliva, nýbrž palivo je dodáváno průběžně. Palivové články jsou schopny pracovat za předpokladu trvalého přísunu paliva neustále. Mezi elektrochemické akumulátory lze zařadit superkapacitor označovaný jako pseudokondenzátor. Obecně kondenzátory pracují na principu uchovávání náboje bez chemické reakce, pouze uspořádáním iontů popřípadě polarizací atomů. Přechodnou variantou mezi elektrochemickým článkem a kondenzátorem je již zmíněný pseudokondenzátor. Další přechodná varianta se nachází na pomezí palivových článků a baterie tzv. průtočné baterie. Ty pracují na podobném principu jak palivový článek, nicméně nance nastává v uložení reaktantu. Výstupem palivového článku je určitý produkt. U průtočného akumulátoru produkt nevzniká, nýbrž elektrolyty mění oxidační hodnotu a jsou ukládány v externích zásobnících. Na Obr. 3-1 lze vidět základní rozdělení elektrochemických akumulátorů.



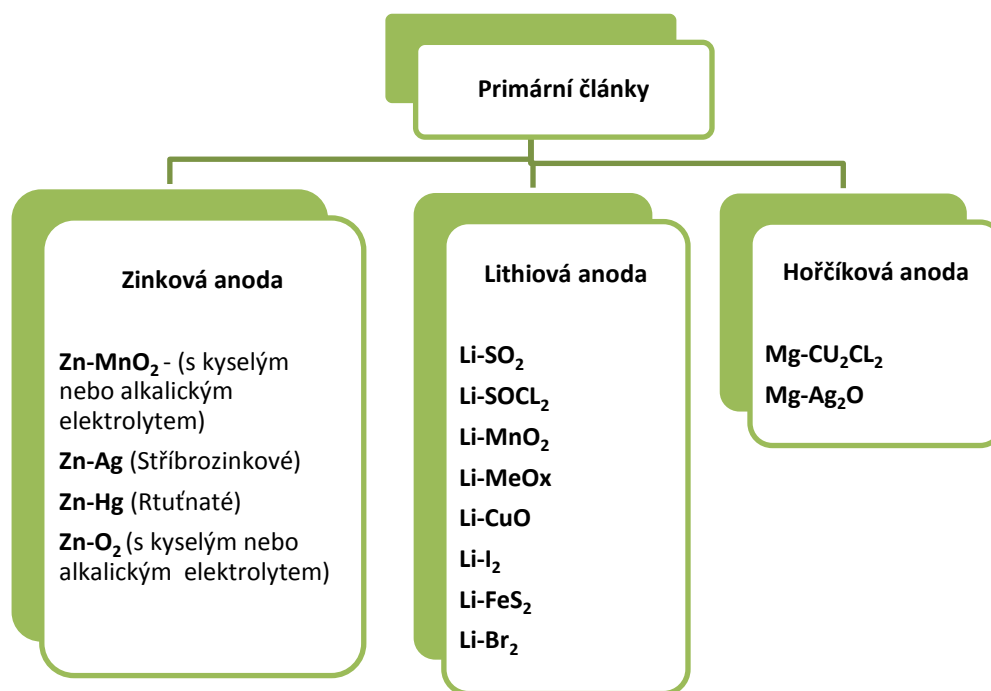
Obr. 3-1 Základní dělení elektrochemických akumulátorů

3.1 Primární články

Vzhledem k povaze těchto článků lze konstatovat, že primární články neplní funkci přímo akumulace, ale považují se za kvantitativní zdroj elektrochemické energie. Z tohoto důvodu nacházejí uplatnění především u drobných spotřebičů s malým odběrem proudu. Speciální články tohoto typu mohou být koncipovány pro vyšší zatížení, ale tento požadavek je kladen pouze u specifických aplikací. Primární články jsou využívány hlavně z hlediska jejich nízké ceny. Dále disponují poměrně malým samovybíjením, vysokou hustotou energie, snadnou údržbou a jednoduchostí použití. Nicméně tyto zdroje energie plní pouze jeden vybíjecí nevratný děj a nejsou tak intenzivně rozvíjeny jako sekundární články.

3.1.1 Základní rozdělení primárních článků

Primární články lze rozdělit dle elektrochemického systému do tří základních skupin, které se odvíjejí od typu zvolené anody, jak je patrné z Obr. 3-2.



Obr. 3-2 Dělení primárních článků podle materiálu anody

Dále lze primární články dělit podle jmenovitého napětí, nebo zdali se článek nachází v aktivním stavu či nikoli. V neaktivním stavu se dodávají převážně články ze skupiny s hořčíkovou anodou, jinak označeny nálevné články. Speciálním typem jsou články s tavnými elektrolyty.

Nejčastěji využívané primární články nalezneme ve skupině se zinkovou anodou. Ty jsou z hlediska ceny nejdostupnější. [6]

3.2 Sekundární články

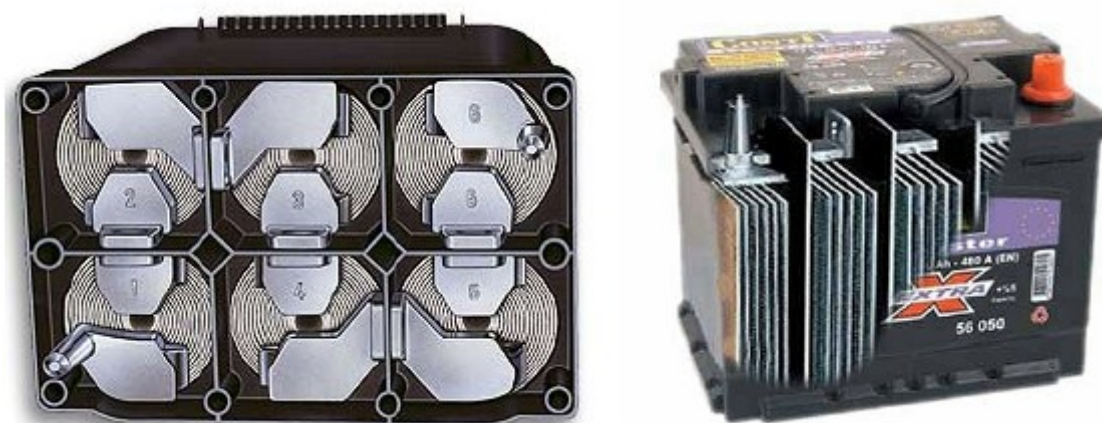
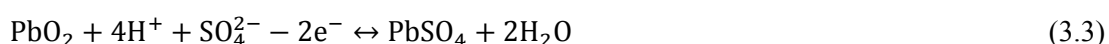
3.2.1 Kyselé akumulátory

Základní a nejznámější typ kyselých akumulátorů je olověný akumulátor. Znakem kyselých akumulátorů je použití kyselin jako elektrolytů.

Olověný akumulátor

Olověný akumulátor patří mezi nejrozšířenější zdroje proudu. Nejčastěji se s ním setkáme v motorových vozidlech, často také doprovází trakční nebo staniční systémy. Nezřídka se uplatňuje jako akumulační prvek solárních systémů či větrných elektráren. Pro již zmíněné aplikace se daný typ akumulátoru mírně liší. Vlastnosti lze ovlivnit jinou konstrukcí separátoru, jiným uzpůsobením elektrod či změnou koncentračních poměrů.

Konstrukce olověného akumulátoru je téměř u všech typů podobná, pouze se nepatrně odlišuje vlivem úprav vlastností pro konkrétní aplikaci. Akumulátor je tvořen převážně plastovým obalem, kde jsou v horní části vyvedeny vývody, pokud se jedná o akumulátor vyžadující údržbu, nalezneme zde i odvětrávací a plnicí otvory. Vnitřní uspořádání tvoří systém kladných a záporných desek ve formě mřížek popřípadě svitků, jež jsou odděleny propustným separátorem Obr. 3-3. Pokud se jedná o klasický nálevný akumulátor, vše je ponořeno do roztoku kyseliny sírové o předepsané hustotě. Aktivní hmotou kladné mřížky je pórovitý kysličník olovičitý. Záporná mřížka je tvořena houbovitým olovem. Celkový zápis chemické reakce při nabíjení a vybíjení je zobrazen rovnicí (3.1). Jednotlivé články se zpravidla sériově spojují. Nejčastěji se využívá spojení třech, šesti popřípadě dvanácti článků. Každý z článků má 2 – 2,15 V. Základní vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 3-1. [8]



Obr. 3-3 Konstruktivní řešení PB akumulátoru s elektrodami ve tvaru svitků a mřížových desek [8]

Olověný akumulátor se zaplavenými elektrodami

Tento typ akumulátoru lze zařadit do skupiny jak bezúdržbových, tak vyžadujících údržbu. Bezúdržbovou koncepcí zapříčiňuje legování mřížek, elektrod vápníkem, dříve antimonem. Dnes se využívá koncepce využívající na kladné elektrodě antimonovou příměs a na záporné vápníkovou příměs. Další možností je koncepce vápník - vápník. Dotování vápníkem se příznivě projevilo na odparu vody, který je v tomto případě minimální. Z tohoto důvodu již není potřeba doplňovat destilovanou vodu a hlídat koncentraci kyselinového roztoku. V případě koncepce vápník – vápník klesá hodnota samovybíjení až na třetinu. [8]

Olověný AGM akumulátor (ventilem řízený)

AGM akumulátor má jinak uzpůsobené elektrody, které jsou odděleny speciálním separátorem. Separátor je tvořen skelnými vlákny dotovanými bórem a těsně přiléhá k jednotlivým elektrodám. Tento typ separátoru má vynikající iontovou vodivost, umožňuje rychlý únik plynů, což poskytuje účinnou rekombinaci a výborně váže elektrolyt. Použité uspořádání také výhodně omezuje mezi mřížkové zkraty, drolení aktivní hmoty a riziko stratifikace kyseliny. Stratifikace způsobuje sulfataci a následující degradaci daného článku, proto AGM akumulátor dosahuje vyšší životnosti a je vhodný jak pro stacionární, tak nestacionární systémy. Hlavní odlišností nálevného akumulátoru od AGM je princip uložení elektrolytu. U AGM je elektrolyt vázaný v separátoru. [8]

Olověný gelový akumulátor (ventilem řízený)

Gelový akumulátor je podobný běžnému nálevnému akumulátoru, rozdíl je pouze v konzistenci elektrolytu. Elektrolyt je vázán v tixotropním křemičitém gelu, který je ještě částečně agitován dalšími příměšemi. Elektrolyt se tedy neváže na separátor, jak to je u AGM akumulátoru. Gelová koncepce oproti AGM skýtá výhodu v závislosti na zvýšené teplotě. U AGM hrozí při vyšších teplotách nadměrné plynování a následně teplotní zkrat. Tato hrozba je u gelového akumulátoru mnohem nižší. [8]

Tab. 3-1 Základní vlastnosti AGM akumulátoru [8], [9]

Měrná energie	Měrný výkon	Orientační cena	Životnost	Počet cyklů	Provozní teplota	Účinnost	Samovybíjení	Jmenovité napětí
[Wh.kg ⁻¹]	[W.kg ⁻¹]	[Kč za kWh]	[Rok]	[-]	[°C]	[%]	[% za měsíc]	[V]
30 - 40	600	3000 - 6000	> 10	> 1000	-20 - +60	75 - 80	1 - 3	2,15

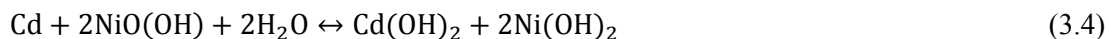
3.2.2 Alkalické akumulátory

Do skupiny alkalických akumulátorů zasahují převážně články na bázi zinku. Znakem této skupiny akumulátorů je využití hydroxidu draselného (KOH) jako elektrolytu. Ačkoli je mnoho variant alkalických akumulátorů, uvedeny jsou pouze dominující typy.

Ni-Cd akumulátor

Ni-Cd akumulátor již není tak popularizovaný, jak tomu bylo dříve, nicméně stále poskytuje vlastnosti, které nejsou tak snadno docílitelné u jiných akumulátorů jako např. velmi malý vnitřní odpor, možnost úplného vybití aj.

Ve vybitém stavu tvoří kladnou elektrodu článku hydroxid nikelnatý, zápornou hydroxid kadmennatý. Vše je odděleno separátorem, který je napuštěn hydroxidem draselným rozpuštěným ve vodě. Separátor odděluje kladný a záporný elektrodový systém. Při nabíjení se aktivní složka kladné elektrody, hydroxid nikelnatý, mění na nikloxihydroxid (dvojmocný nikl přechází na trojmocný) a hydroxid kadmennatý na kovové kadmium. Tyto děje však mohou probíhat pouze do plného nabití elektrod. Vybíjení je reverzibilního charakteru. Celková reakce je dána rovnicí (3.4).



Dříve nacházely články Ni-Cd uplatnění především jako malé akumulátory napájející komerční elektroniku. Dnes již tomu tak není, využití ještě nacházejí u spotřebičů s velkými proudovými rázy např. ruční nářadí. Další možnost využití je ve stacionárních systémech, kde mohou poskytovat zásobu energie 10 – 100 kWh. Životnost přesahuje 1000 cyklů při poklesu kapacity na 80 %. Dosahují účinnosti okolo 80 %. Vyznačují se průměrnou měrnou energií, která se pohybuje v rozmezí 40 – 60 Wh/kg, což je více než poskytují olověné akumulátory. [5], [11]

Ni-MH akumulátor

Tento akumulátor patří spolu s Li-ion články mezi nejpoužívanější v dané kategorii. Kladná elektroda je složena z oxid-hydroxidu nikelnatého ($\text{NiO}(\text{OH})$), elektrolytem je zpravidla vodný roztok hydroxidu draselného. Záporná elektroda je sestavena kovovou slitinou tvořící s vodíkem směs hydridů. Slitina může obsahovat nikl, kobalt, mangan případně i lanthanoidy jako praseodym, cer, neodym, lanthan. Rovnice (3.5) představuje celkový zápis reakce při vybíjení i nabíjení, (3.6) reakce na záporné elektrodě, (3.7) reakce na kladné elektrodě. M představuje zmíněnou sloučeninu. [5]



Využití tohoto článku je nejčastější u drobných spotřebičů. Pro stacionární systémy nenachází příliš uplatnění, jelikož je cenově méně dostupný než Ni-Cd nebo Pb akumulátory. Oproti Ni-Cd

akumulátorům má dvojnásobnou měrnou kapacitu, neobsahuje toxické kadmium a nepodléhá tak razantně paměťovému efektu. Trpí však vyšším samovybíjením a menším rozsahem pracovních teplot. [5]

Ni-Fe akumulátor

Ni-Fe je jeden z nejstarších akumulátorů. Anodou je v nabitém stavu Ni(OH)_2 , katodou pak Fe. Elektrolytem je 21 % hydroxid draselný dotovaný hydroxidem lithným. Při vybíjení se anoda pokrývá vrstvou Ni(OH)_3 , katoda pak pouze Fe. Tento typ akumulátoru byl hojně využíván ve staničních či trakčních systémech. Jeho hlavní nevýhodou je poměrně značné samovybíjení a plynování. Tyto baterie jsou již nahrazeny výše zmíněnými, ale stále se dostávají na trh jako staniční baterie díky jejich vysoké životnosti. [11]

Tab. 3-2 Vlastnosti článku na bázi zinku [5], [11]

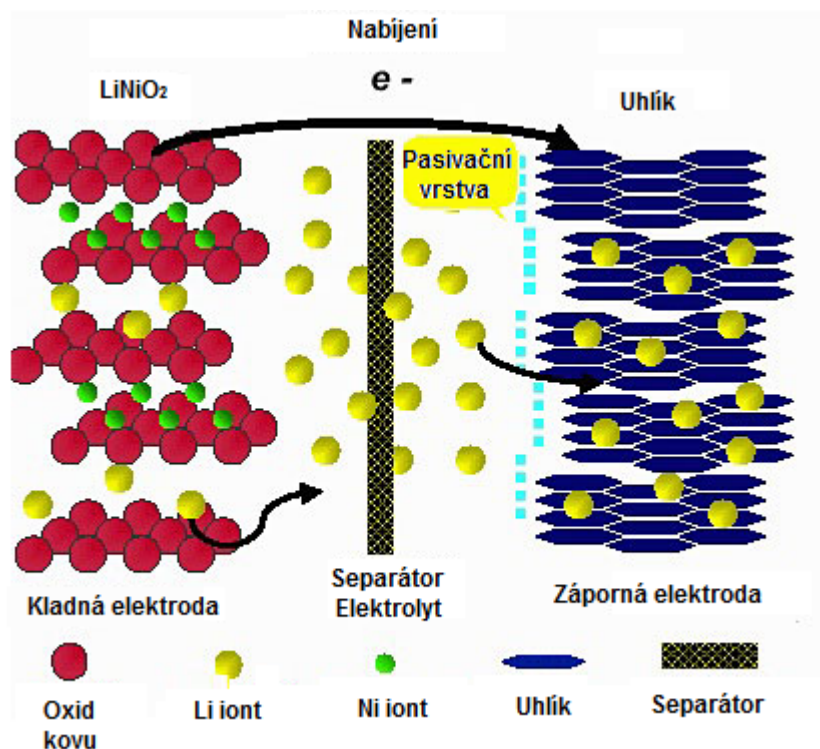
Typ akumulátoru	Ni-Cd	Ni-MH	Ni-Fe
Měrná energie [Wh.kg^{-1}]	45 - 80	60 - 120	30 - 50
Měrný výkon [W.kg^{-1}]	100-200	200	100
Počet cyklů [-]	1500	500 - 1000	1000
Provozní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	-40 až +60	- 20 až + 60	- 40 až + 50
Účinnost [%]	< 80	< 75	> 65
Samovybíjení [% za měsíc]	20	30	20 - 30
Jmenovité napětí [V]	1,2	1,2	1,2

3.2.3 Akumulátory s bezvodým elektrolytem

Li-ion akumulátor

Li-ion akumulátor je nejrozšířenější v oblasti komerční elektroniky. Hlavním důvodem oblíbenosti je velká hustota energie, žádný paměťový efekt a velmi malé samovybíjení. Li-ion můžeme zařadit mezi mobilní akumulátory pohybující se v řádech jednotek Wh až po stacionární systémy schopny uskladnit stovky kWh.

Li-ion pracuje na principu přenosu lithiového iontu Li^+ při vybíjení ze záporné elektrody na kladnou, při nabíjení inverzně, prostřednictvím bezvodého elektrolytu tvořeného převážně lithiovou solí rozpuštěnou v organickém rozpouštědle. Tudiž je důležité použít na anodě a katodě interakční sloučeniny schopny tento iont přijmout. Celkový elektrochemický proces popisuje rovnice (3.8), na záporné elektrodě pak (3.9), kladné elektrodě (3.10). Tento děj je odlišný od jiných akumulátorů, kde hraje hlavní roli při tvorbě chemické vazby elektrolyt. U Li-ion je elektrolyt pouze nositelem iontů.



Obr. 3-4 Princip Li-ion (LiNiO_2) článku [12]

Li-ion články se mohou lišit převážně materiálem kladné elektrody, ale existují varianty, kde je obměněna záporná elektroda nebo elektrolyt. Tyto úpravy mírně odlišují vlastnosti jednotlivých článků. V Tab. 3-3 lze vidět základní rozdělení materiálů, které se používají pro sestavení Li-ion článků. Tab. 3-4 zobrazuje základní vlastnosti Li-ion.

Správné provedení elektrod má zásadní význam pro splnění požadavků vysokého výkonu a kapacity. Kladná elektroda je sestavena ze tří částí, aktivního materiálu představující oxid kovu a sběrné fólie z mědi nebo hliníku. Jako pojivo příslušné kovové vrstvy je použit polyvinyliden fluorid (PVDF) nebo kopolymer polyvinyliden fluorid-co-hexafluoropropylen (PVDF-HFP). Povrch může být pokryt vrstvou uhlíku nebo grafitu. Aktivní materiál kladné elektrody je převážně oxid kovu, záporné elektrody uhlík v různých formách. Zpravidla mají aktivní materiály elektrod vrstevnatou nebo tunelovou strukturu.

Jednotlivé elektrody jsou od sebe izolovány mikroporézní vrstvou polyetylenu nebo polypropyleny tzv. separátorem nacházejícím se v kontaktu s elektrolytem, který může být kapalný, gelový popřípadě pevný. [14]

Tab. 3-3 Materiály využívané v Li-ion [14], [15]

Materiál kladné	Materiál záporné	Elektrolyt	
Elektrody	elektrody	Soli	Rozpouštědla
LiCoO ₂	Grafit (LiC ₆)	LiPF ₆	Ethyl uhličitán
LiMn ₂ O ₄	Pevný Uhlík (LiC ₆)	LiBF ₄	Dimethyl uhličitán
LiNiO ₂	(Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)	LiCLO ₄	Diethyl uhličitán
LiFePO ₄	Si(Li _{4,4} Si)	LiAsF ₆	
LiFeYPO ₄	Ge(Li _{4,4} Ge)	LiSO ₃ CF ₃	
Li ₂ FePO ₄ F		LiBF ₄	
LiCO _{1/3} Ni _{1/3} Mn _{1/3} O ₂			

- **LiCoO₂** – představuje nejpoužívanější materiál katody, využívá se v mobilních telefonech, laptotech. Poskytuje průměrnou kapacitu a životnost více jak 500 cyklů. Je méně chemicky a teplotně stabilní než ostatní typy Li-ion. Při průrazu a následném vnitřním zkratu hrozí požár. [15]
- **LiMn₂O₄** – poskytuje vyšší napětí, je stabilnější než LiCoO₂, naopak má o 20 % menší hustotu energie. Tento akumulátor je již bezpečnější a méně toxický. Dokáže pracovat při vyšších teplotách a zároveň náklady na výrobu jsou nižší. [15]
- **Li₄Ti₅O₁₂** – u tohoto typu baterie je nahrazena grafitová anoda anodou Li₄Ti₅O₁₂. Tento materiál se používá často ve spojení LiMn₂O₄, nicméně je kompatibilní se všemi druhy kladných elektrod. Disponuje velkým rozsahem teplot, vysokým počtem cyklů a značným měrným výkonem. Nevýhoda spočívá v nižší kapacitě, menšímu potenciálu a nákladnější výrobě. [15]
- **LiFePO₄** – poskytuje vynikající tepelnou a chemickou stabilitu, také vysokou cykličnost a měrný výkon. Nevýhody se projevují v menší měrné energii. Dá se říci, že ze zmíněných Li-ion baterií je tato nejvýhodnější a to z finančního hlediska, bezpečnosti a toxicity. [15]

Tab. 3-4 Základní vlastnosti Li-ion [14]

Li-ion varianty	Měrná energie	Hustota energie	Počet cyklů	Jmenovité napětí článku
	[Wh/kg]	[Wh/l]	[-]	[V]
LiCoO ₂	170-185	450-490	>500	3,6
LiMn ₂ O ₄	90-110	280	>1000	3,8
LiFePO ₄	80-125	130-240	>2000	3,2
LiMn ₂ O/Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	65-100	118-200	12000	2,5
LiCO _{1/3} Ni _{1/3} Mn _{1/3} O ₂	150-190	270-365	1500	3,7

Li-ion polymer

Principem i použitým materiálem jsou tyto akumulátory totožné s Li-ion. Rozdíl je pouze v použití elektrolytu, který se nachází v pevném skupenství. Tyto polymery jsou obecně polyethery, poly-ethylenoxid označován jako (PEO) nebo polypropylen oxid (PPO). Pevný elektrolyt figuruje na přenosu iontu podobně jak kapalný, výhody spočívají v mechanické odolnosti a zároveň bezpečnosti akumulátoru. Není tedy potřeba pevný kovový obal. Li-pol neobsahuje separátor, jelikož jeho funkci zastává polymerní elektrolyt. Nevýhodou tohoto článku představuje špatná iontová vodivost při teplotách nižších jak 70 °C. Tuto nevýhodu eliminuje Li-ion s hybridním elektrolytem tzv. Li-ion polymer GEL. [13]

Li-ion polymer GEL

Vlastnosti tohoto článku jsou v podstatě stejné, jak představují články Li-ion. Elektrolyt formou gelu zajišťuje dobrou iontovou vodivost, integritu, zároveň bezpečnost a odolnost zůstává na úrovni Li-ion polymer. Použité materiály elektrod i princip funkce zůstává totožný jak v předchozích Li-ion systémech. Elektrolytem je dvousložkový systém založený na matici polymeru obsahující tekutý elektrolyt. [13]

3.2.4 Akumulátory Kov-vzduch

Akumulátory kov-vzduch jsou obecně články s nejvyšší hustotou energie. Tato skutečnost je docílena využitím externího reaktantu katody, kterým je kyslík.

Zn-vzduch

Zn-vzduch patří do skupiny primárních, případně palivových článků, tedy ne zcela oprávněně je zařazen mezi sekundární články. Jelikož se vývoj zabývá možnostmi dobíjení tohoto článku, je zařazen právě zde. Přímé dobíjení je velmi problematické a prozatím nelze dosáhnout účinnosti více jak 50 %, proto se volí varianta výměny zinkové kazety, která je externě repasována.

Článek je sestaven ze zinkové porézní anody, která je nasycena elektrolytem převážně hydroxidových sloučenin. Vzdušný kyslík reaguje s vodou na uhlíkové katodě a tvoří hydroxylové ionty putující na anodu, kde vytvářejí zinkovou pastu ve formě $(Zn(OH)_4^{2-})$, ta uvolňuje elektrony procházející přes zátěž na katodu. $Zn(OH)_4^{2-}$ se rozkládá na oxid zinečnatý a vodu, která se vrací do elektrolytu. Reakce poskytuje teoretický napěťový potenciál 1,65 V, prakticky se pohybuje v rozmezí 1,35 – 1,4 V. Reakce vzniklá při vybíjení na anodě je zobrazená rovnicí (3.11), na katodě rovnicí (3.12), celková reakce pak (3.13). [16]



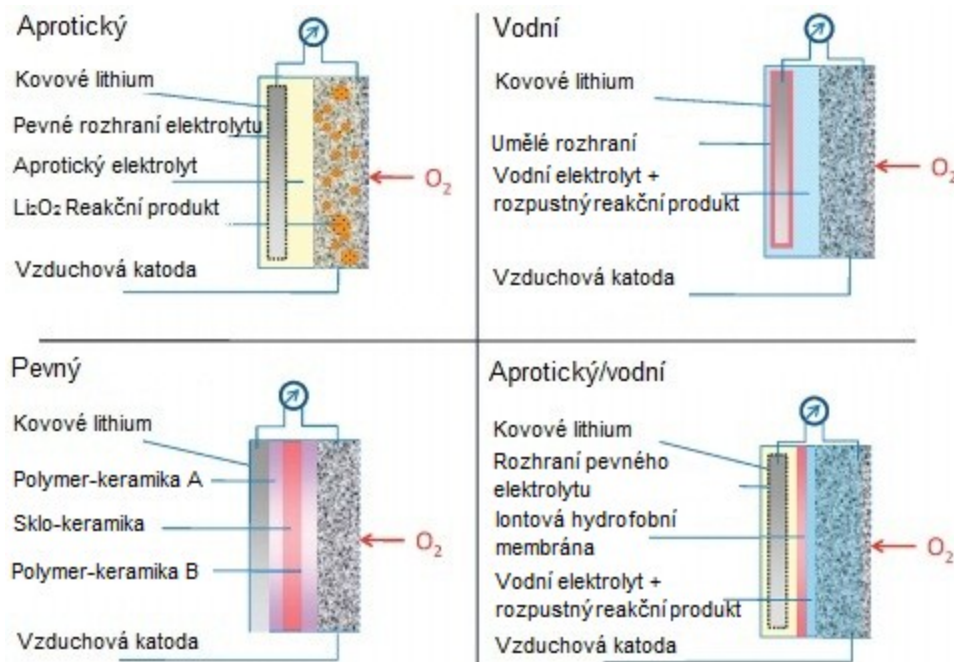
Výkon a kapacitu nám ovlivňují faktory např. katodový prostor, umožnění přísunu vzduchu, pórovitost elektrod a katalytická hodnota katody.

Výhodou akumulátoru Ni-vzduch je vysoká hustota energie, teoreticky 1370 Wh/kg, praktická hodnota nepřesahuje 500 Wh/kg. Další výhodou je dostupnost a cena použitých materiálů. Samovybitením ztrácí 2 % kapacity za rok pro neaktivní články, je tedy možnost dlouhého skladování. Články skýtají také řadu nevýhod, jako je nízký měrný výkon, pomalý náběh, malý teplotní rozsah a odolnost vůči nadměrné vlhkosti.

Využívají se jako malé knoflíkové baterie napájecí spotřebiče s minimální spotřebou. Nalezneme je i ve vojenských speciálních aplikacích. [16], [17]

Li-vzduch

Akumulátory tohoto typu představují rozvíjející se a potenciálně možnou konkurenční skupinu již rozšířeným typům akumulátorů. Existují varianty primárních článků, nicméně je možno vyrobit i sekundární varianty těchto článků. Ve 21. stol. je předpokládán jejich značný rozvoj, proto patří oprávněně mezi sekundární články. Prozatím je technologie ve vývoji a bude potřeba značných finančních prostředků pro zdokonalení natolik, aby bylo možné komerční rozšíření. [18]



Obr. 3-5 Možné varianty článku Li-vzduch [18]

Li-vzduch využívají oxidaci lithia na anodě a redukci kyslíku na katodě za účelem vytvoření elektrické energie. Excelují především vysokou hustotou energie. V současné době existují návrhy čtyř typů článků lišící se skladbou elektrolytu. Tři z nich jsou na tekuté a jeden na pevné bázi. Na tekuté bázi jsou elektrolyty aprotické, případně kombinace zmíněných typů. Na pevné bázi je elektrolytem keramika umožňující migraci iontů. Obr. 3-5 zobrazuje blokově konstrukční uspořádání jednotlivých variant Li-vzduch. V Tab. 3-5 jsou uvedeny základní vlastnosti Li-vzduch. [18]

Li-vzduch (aprotický elektrolyt)

Materiálem anody je lithium, které se vlivem vybíjení oxiduje. Uvolňuje se elektron e^- a iont lithia Li^+ podle rovnice (3.14). U katody nastává rekombinace iontu lithia s kyslíkem v porézní uhlíkové vrstvě obohacené katalyzátorem (MnO_2 nebo Mn_3O_4) za vzniku LiO_2 nebo Li_2O_2 . Děj je popsán rovnicí (3.15), (3.16). Tyto produkty reakce nejsou příliš žádané, jelikož zapříčiňují zanášení reakční oblastí a brání další reakci. Navíc jsou inertní aprotickému elektrolytu, čili nedochází k rozpouštění. Hlavní výhodou aprotického elektrolytu je tvorba spontánní bariéry mezi anodou a elektrolytem zapříčiňující ochranu kovu lithia z další reakce. [18]

Li-vzduch (vodný elektrolyt)

Anoda je opět lithiovým kovem, katoda porézní uhlík. Elektrolytem je mírně kyselý nebo zásaditý vodní roztok. Pro chemický proces na bázi kyseliny je uvedena rovnice (3.17), na bázi zásady (3.18). Výhoda vodního elektrolytu spočívá v rozpustnosti produktu reakce na katodě. Nedochází k zanášení porézní vrstvy uhlíku. Nevýhoda vodního elektrolytu je v interakci vody s lithiovým kovem. Z tohoto důvodu je anoda pokryta vrstvou pevného elektrolytu lithiové keramiky nebo skla. Na základě této úpravy je snížena vodivost. [18]



Li-vzduch (aprotický/vodný)

Zde je pokus spojit výhody aprotických i vodních elektrolytů. Aprotický elektrolyt je v kontaktu s anodou (kovovým lithiem), vodní s katodou. Oba elektrolyty jsou odděleny membránou vedoucí lithiové ionty. [18]

Li-vzduch (pevný elektrolyt)

Pevný elektrolyt eliminuje problémy tekutých elektrolytů u anody/katody. Dosahuje vyšší bezpečnosti. Složení anody i katody zůstává stejné jak v předešlých variantách. Tekutý elektrolyt je nahrazen speciální keramikou, sklem nebo sklo-keramikou. Anoda a katoda jsou obvykle odděleny polymer-keramickými kompozity podporující přenos iontů. Tyto kompozity slouží celkově ke snížení impedance pevného elektrolytu. Pevný elektrolyt je stále na pozici s nižší vodivostí než aprotický či vodný. [18]

Tab. 3-5 Vlastnosti článku kov-vzduch [18]

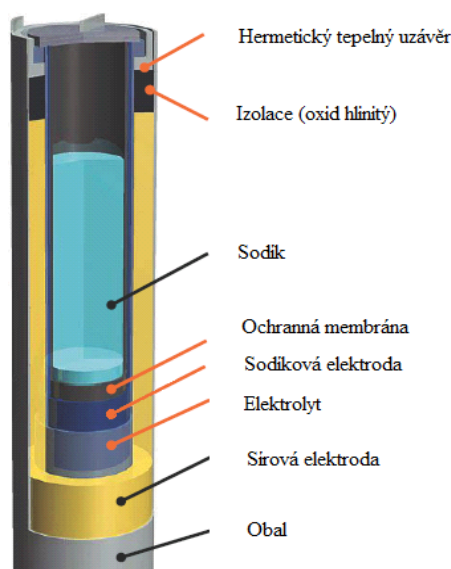
Typ	Měrná energie	Měrný výkon	Počet cyklů	Provozní teplota	Účinnost	Samovybíjení	Jmenovité napětí
	[Wh.kg ⁻¹]	[W.kg ⁻¹]	[-]	[°C]	[%]	[% za měsíc]	[V]
Zn-vzduch	470	100	<100	-10 - +40	50	0,2	1,65
Li-vzduch	1200-1600	-	-	-	65	1	2,96

3.2.5 Vysokoteplotní akumulátory s pevným elektrolytem

Na-S akumulátor

Článek Na-S využívá tekutý sodík jako anodu, roztavenou síru jako katodu. Zajímavostí je, že elektrolyt je v pevném skupenství. Skládá se převážně ze speciální struktury keramiky obsahující oxid hliníku (Al₂O₃). Vše je hermeticky uzavřeno. Akumulátor pracuje při teplotě okolo 300 °C, podmínkou správné funkce je dodržení tekutosti obou elektrod. Sodík má teplotu tání okolo 97 °C, síra okolo 115 °C, čili pro provoz stačí teplota o málo vyšší, ale vzhledem k účinnosti je 300 °C optimální.

Při vybíjení dochází k průchodu kladných iontů sodíku Na⁺ elektrolytem a elektronů e⁻ uzavřeným obvodem. Síra přijme elektron za vzniku iontu S⁻. Ionty sodíku se spojí s ionty síry a vytvoří polysulfidy sodíku. Celý princip funguje i reverzibilně. Celková reakce je popsána rovnicí (3.19). Na Obr. 3-6 je zobrazeno konstrukční uspořádání Na-S. [19]



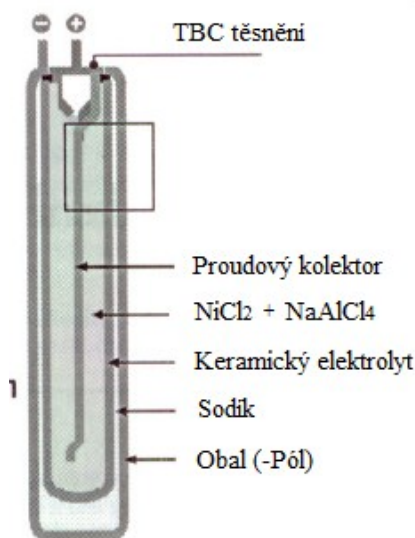
Obr. 3-6 Konstrukční uspořádání akumulátoru Na-S [19]

Velkou výhodou tohoto akumulátoru je jeho účinnost dosahující až 87 %, počet cyklů se pohybuje okolo 2500 - 4500 do poklesu kapacity na 80 %. Měrná energie se pohybuje v řádech 120 - 150 Wh. Nevýhodou je provozní teplota, která je na rozhraní 300 °C. Materiály na zhotovení článku jsou poměrně levné, nicméně výrobní náklady nejsou zcela příznivé. Další nevýhoda spočívá v bezpečnostních rizicích. Jeho využití nachází uplatnění především ve velkoobjemových

akumulátorech. V USA je akumulační systém zvaný BESS schopen dodávat 1 MW po dobu sedmi hodin, v Japonsku je instalováno 270 MWh pomocí systému Na-S. [19], [12]

Na-NiCl₂ akumulátor

Akumulátor Zebra je zařazen podobně jako Na-S do vysokoteplotních akumulátorů. Zápornou anodu představuje tekutý sodík. Elektrolytem je podobně jak Na-S speciální keramika s obsahem Al₂O₃. Zebra obsahuje druhý tekutý elektrolyt NaAlCl₄, jehož úkolem je umožnit rychlý transport iontu z pevného niklchloridu tvořící druhou elektrodu. Celková rovnice chemické reakce je popsána rovnicí (3.20).



Obr. 3-7 Konstrukční uspořádání akumulátoru Na-NiCl₂ [20]

Na Obr. 3-7 je zobrazeno konstrukční uspořádání Na-NiCl₂. Akumulátory tohoto typu se používají především ve stacionárních systémech pro střední a velké akumulace. Snahou je využití v automobilovém průmyslu, ale stále skýtají řadu nevýhod pro komerční rozšíření. Výhody jsou podobné jako u Na-S baterií. Vlastnosti zmíněných vysokoteplotních akumulátorů lze zhlédnout v Tab. 3-6. [20]

Tab. 3-6 Vlastnosti akumulátorů Na-S a Na-NiCl₂ [19], [20], [12]

Typ akumulátoru	Na-S	Na-NiCl ₂
Měrná energie [Wh.kg ⁻¹]	150	90-120
Měrný výkon [W.kg ⁻¹]	200	200
Počet cyklů [-]	2500	1500
Provozní teplota [°C]	300	270–350
Účinnost [%]	< 87	< 90
Jmenovité napětí [V]	2	2,58

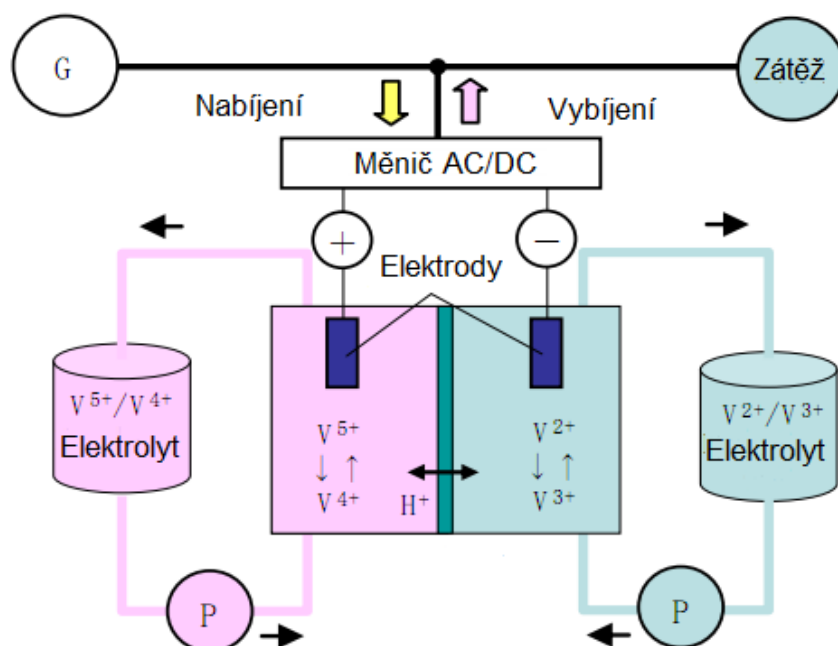
3.3 Průtočné články

Průtočné články patří mezi nový druh článků schopných akumulovat i poměrně velké energetické objemy v řádech více jak stovek MWh. Principiálně se od klasických baterií odlišují skladováním reaktantu (elektrolytu), který je možno uskladnit vně reakční oblasti v externích zásobnících. Výhodou tohoto uspořádání je možnost téměř neomezeně rozšiřovat množství reaktantu. Omezením se stává pouze návrh reakční oblasti, jež nám omezuje maximální odebíraný výkon.

Tab. 3-7 Základní redoxní páry průtočných baterií [22]

Redoxní pár	Záporný článek		Kladný článek		Celý článek
	Elektrolyt	Redoxní potenciál [V]	Elektrolyt	Redoxní potenciál [V]	Standardní potenciál E ₀ [V]
U/U	$U^{4+} + e^- \rightarrow U^{3+}$	-0.607	$UO^{2+} + e^- \rightarrow UO_2^+$	0.06	0.7
Fe/Ti	$Ti^{3+} + e^- \rightarrow Ti^{2+}$	-0.9	$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	0.771	1.7
Fe/Cr	$Cr^{3+} + e^- \rightarrow Cr^{2+}$	-0.407	$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	0.771	1.2
V/V	$V^{3+} + e^- \rightarrow V^{2+}$	-0.255	$V^{5+} + e^- \rightarrow V^{4+}$	0.991	1.2
Br/S	$S + 2e^- \rightarrow 2S^{2-}$	-0.48	$Br^{2+} + 2e^- \rightarrow 2Br^-$	1.087	1.5
Zn/Br	$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	-0.763	$Br^{2+} + 2e^- \rightarrow 2Br^-$	1.087	1.9
V/O	$V^{3+} + e^- \rightarrow V^{2+}$	-0.255	$O_2 + 4H^+ + e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229	1.5
Ti/O	$Ti^{3+} + e^- \rightarrow Ti^{2+}$	-0.9	$O_2 + 4H^+ + e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229	2.1
Cr/O	$Cr^{3+} + e^- \rightarrow Cr^{2+}$	-0.407	$O_2 + 4H^+ + e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229	1.6

Průtočné baterie jsou často nazývané jako redoxní baterie. Princip je založen na redoxní reakci mezi dvěma elektrolyty v systému. S výhodou se využívá vanadu, který může existovat ve více valenčních uspořádáních. Celý systém je sestaven ze dvou článků od sebe oddělených membránou schopnou propustit pouze ionty. Existuje mnoho kombinací tvořící redoxní pár, ale v praxi lze využít bez nežádáných projevů pouze omezené množství redoxních párů. Tab. 3-7 zobrazuje nejvhodnější redoxní páry, jež je možno pro tento systém použít. Pro komerční rozšíření se prozatím prosadily pouze tři druhy průtočných akumulátorů. Tyto typy tvoří vanad - vanad označovány (V/V případně VRB), dále polysulfid-bromid (PSB) a Zinek - brom (ZnBr). [21]



Obr. 3-8 Uspořádání systému VRB [21]

Na Obr. 3-8 je zobrazeno možné uspořádání systému VRB. V mírně kyselém elektrolytu (H_2SO_4) je rozpuštěn vanad, jehož energetická hladina závisí na stupni vybití, případně nabití. Čerpadla zajišťují cirkulaci elektrolytu k membráně, zde dochází k reakci, která je popsána rovnicí (3.21) pro nabíjení a rovnicí (3.22) pro vybití. Jednotlivé poloreakce jsou uvedeny v Tab. 3-7. Při nabíjení a vybití dochází k přenosu iontu H^+ mezi elektrolyty přes porézní membránu. Při reakci dochází k zahřívání jednotlivých článků, proto je nutno doplnit systém o vyhovující chladicí zařízení. [21], [22]



Cena průtočných akumulátorů se pohybuje okolo 400 - 600 €/kWh, navýšení elektrolytu v zásobnících pak představuje investici ~ € 20 pro ZnBr články a ~ € 50 pro V/V. Jelikož jsou tyto systémy velmi málo komerčně rozšířeny, může být cena nadále ovlivněna komerčním rozšířením. Ve srovnání s jinými technologiemi jsou průtočné akumulátory relativně levné s ohledem na dobrý výkon a dosahují poměrně solidní životnosti. Tab. 3-8 uvádí základní vlastnosti průtočných akumulátorů. [21]

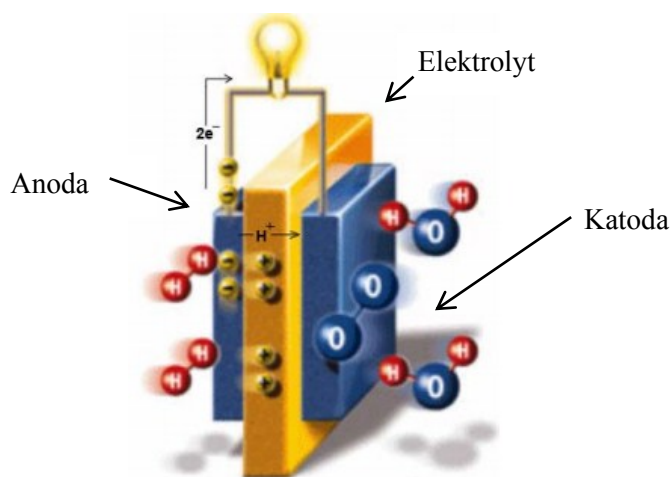
Tab. 3-8 Základní vlastnosti průtočných baterií [22]

	V/V	ZnBr	PSB
Typický rozsah výkonu [MW]	< 3	< 1	< 15
Typický rozsah velikostí [MWh]	0,5 - 5	0,01 – 5	0 – 120
Hustota energie [Wh/l]	16 - 33	60 – 90	20 – 30
Účinnost [%]	70 - 85	65 – 75	60 – 75
Počet cyklů [-]	>12 000	> 2000	-
Životnost [let]	5 - 10	-	15

Průtočné akumulátory nacházejí uplatnění především jako stacionární systémy. Z ekonomického hlediska jsou výhodnější systémy s vyšší kapacitou v řádech více jak 100 kWh. Prozatím je tento způsob akumulace zkoumán a vyvíjen, proto nelze hovořit, že se jedná o běžný akumulátor. Jeho výhody nejsou zanedbatelné a předurčují průtočné akumulátory k vyššímu zastoupení.

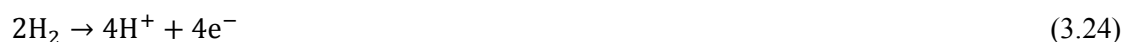
3.4 Palivové články

Palivové články patří do skupiny elektrochemických článků využívající kvantitativní zásoby. Zpravidla nepracují reverzibilně, čili pokud chceme zařadit palivové články mezi akumulací systémy, je potřeba uvést proces, při kterém lze získat zpětně palivo pro daný palivový článek. V palivovém článku dochází k chemické reakci přivedeného paliva a oxidantu za vzniku elektrického proudu, tepla a produktu. Tento děj můžeme také nazvat studeným spalováním. Výhodou tohoto cyklu je přímá přeměna energie chemické reakce na energii elektrickou, nicméně technologie ještě není natolik výhodná, aby palivový článek dominoval v trvalé produkci velkých objemů energií. Palivové články můžeme rozdělit podle pracovní teploty na nízkoteplotní (60 – 130 °C), středoteplotní (160 – 220 °C) a vysokoteplotní (600 – 1050 °C), dále pak podle použitého elektrolytu viz Tab. 3-9. [4]



Obr. 3-9 Princip palivového článku PEMFC [4]

Obr. 3-9 zobrazuje princip palivového článku. Vodík je přiváděn k membráně ze strany anody pomocí desky s kanálky, kde se rozkládá nejdříve na samotné atomy a posléze iont H^+ a elektron e^- . Elektron putuje zátěží na katodu, kde dochází ke štěpení kyslíku na platinovém katalyzátoru za vzniku O^{2-} . Membrána je propustná pouze pro kladné ionty, čili na katodové straně dochází k reakci H^+ a O^{2-} za vzniku produktu H_2O a tepla. Rovnice celkové reakce je popsána vztahem (3.23), na anodě (3.24) a katodě (3.25). [4]



Tab. 3-9 Vlastnosti a rozdělení palivových článků [4]

Typ článku Označení	Elektrolyt	Pracovní teplota (°C)	Možný výkon	Účinnost (%)	Napětí naprázdno (V DC)	Použité palivo
Alkalické palivové články (AFC)	Hydroxid draselný (KOH)	65-220	400 W až 100 kW	60 - 70	1,2	$H_2 + O_2$
Palivové články s polymerní membránou (PEMFC)	Membrána s iontovou vodivostí	50 – 120	50 W až 75 kW	~ 60	1,1	H_2 / metanol + O_2 /vzduch
Metanolové palivové články (DMFC)	Membrána s iontovou vodivostí	130	5 W až 100 kW	20 - 40	1,1	Methanol/ethanol + O_2 /vzduch
Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)	Kyselina fosforečná H_3PO_4 (100%)	150 – 210	< 10 MW	~ 40	1,1	H_2 /plyn bohatý na vodík + vzduch
Palivové články s roztavenými uhličitany (MCFC)	Tavené karbonáty lithia, sodíku draslíku	600-700	10 kW až 100 MW	< 55	1	H_2 / plyn bohatý na vodík / CO + vzduch
Palivové články s pevnými oxidy (SOFC)	Stabilizovaný zirkonoxid (ZrO_3/Y_2O_3)	650 – 1000	10 kW až 2 MW	~ 55	1	H_2 /plyn bohatý na vodík / CO + vzduch

Získávání vodíku

Vodík je hlavním palivem palivových článků, nicméně se v přírodě vyskytuje pouze jako vázaný prvek ve sloučeninách, proto je ho potřeba z těchto sloučenin vyseparovat. Existují dva základní způsoby, jak lze tuto operaci provést. První je tzv. reforming, představující získávání vodíku z fosilních paliv. Jedná se tedy o kvantitativní zásoby paliva se zpětnou ireverzibilitou. Jelikož tato práce směřuje k akumulaci elektrické energie, hlavním způsobem získávání vodíku pro tento účel je tzv. elektrolýza.

Elektrolýza

Při elektrolýze se využívá elektrické energie k rozkladu vody na její elementární prvky. Tento způsob je výhodný, jelikož lze vytvořit zásobu energie ve formě vodíku v případě přebytku energie. Elektrolyzátor je sestaven z anody a katody skládaných do baterií a ponořených v roztoku vody s hydroxidem draselným zajišťujícím vodivost vody. Anoda (kladná elektroda) je vyrobena z niklu a mědi a je pokryta oxidem manganu, wolframu či ruthenia. Na povrchu dochází k párování atomárního kyslíku. Katodu (zápornou elektrodu) tvoří zinek potažený tenkou vrstvou platiny působící jako katalyzátor a umožňující rychlejšímu párování vodíku. Elektrody jsou od sebe odděleny separátorem zabraňujícím míchání vzniklých plynů. Účinnost elektrolýzy se pohybuje okolo 65 – 80 %.

4. Elektrostatické, elektromagnetické akumulátory a superkapacitory

4.1 Kondenzátory a superkapacitory jako akumulární systémy

Kondenzátor do nedávna sloužil pouze jako filtrační popř. kompenzační prvek elektrotechniky. Jako akumulární prvek nenacházel uplatnění kvůli velmi nízké kapacitě energie. Vlivem rozvoje nanotechnologie lze lépe upravit povrch elektrod a navýšit kapacitu na zajímavou hodnotu. Dalším přínosem jsou nové technologie výroby. Kondenzátory můžeme rozdělit do tří základních skupin a to na kondenzátory s dielektrikem, kde hlavní roli při uchovávání energie hraje polarizace dielektrika. Druhou variantou jsou kondenzátory EDLC. Zde plní hlavní funkci uchování elektrického náboje ionty. Poslední skupinu tvoří tzv. superkapacitory (pseudokondenzátory). Ty již nelze zařadit mezi elektrostatické akumulátory, jelikož zde se energie uchovává podobně jak u elektrochemického akumulátoru, pomocí oxidačně redukční reakce.

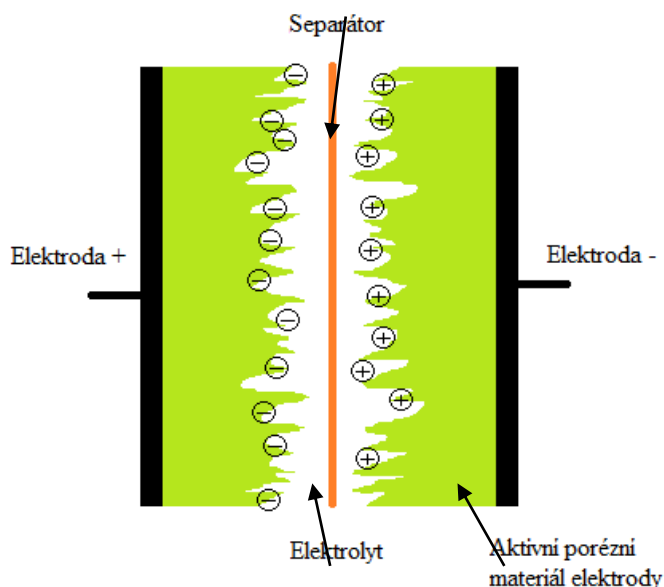
Klasické kondenzátory s dielektrikem

Klasický kondenzátor pracuje na principu polarizace dielektrika. Skládá se zpravidla z jedné kladné a záporné vodivé desky, které jsou odděleny dielektrikem (izolantem). Pokud přivedeme elektrický potenciál na jednotlivé desky, nastane polarizace atomů dielektrika. Kladná jádra atomů jsou přitahována k záporné elektrodě a záporné elektrony ke kladné elektrodě. Mezi tyto kondenzátory lze zařadit kondenzátory slídivé, tantalové, aj. Kondenzátory tohoto druhu dosahují velmi malé hustoty energie vztahmo k objemu, ale poskytují nejvyšší měrný výkon.

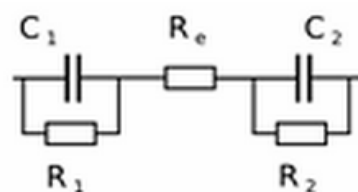
Kondenzátory EDLC

EDLC kondenzátory jsou často zařazovány mezi elektrochemické akumulátory, jelikož se na uchování energie podílí elektrolyt obsahující ionty, nicméně pokud se podíváme na princip, můžeme EDLC zařadit i mezi elektrostatické akumulátory.

Principiálně lze průběh uložení náboje vysvětlit podle Obr. 4-2, náhradní schéma je zobrazeno Obr. 4-1. Kondenzátor je tvořen ze dvou vrstev, které jsou odděleny separátorem. Elektrolyt obsahuje rovnoměrně rozložené jak kladné, tak záporné ionty. Po přivedení elektrického potenciálu na jednotlivé elektrody se ionty začnou uspořádávat k elektrodě s opačným potenciálem, nežli nese samostatný iont. Jinými slovy ionty se snaží neutralizovat povrch elektrod a jsou k povrchu vázány elektrostatickou, absorpční a koncentrační silou. [24]



Obr. 4-2 Princip EDLC kondenzátoru



Obr. 4-1 Náhradní schéma EDLC[23]

Elektrolyt tvoří převážně organická rozpouštědla, případně vodné roztoky. Aktivním materiálem elektrod je dnes výhradně uhlík a jeho formy např. saze, aerogel, uhlíkové vlákno, pružné grafity, nanotrubičky a jiné. Formy uhlíku excelují velkou plochou až $3000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, chemickou netečností, velkou vodivostí a nízkou cenou. [23]

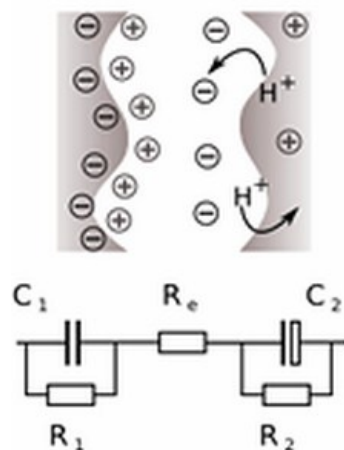
Superkapacitor

Superkapacitor je principem a konstrukcí velmi podobný elektrochemickým akumulátorům. Při uchovávání náboje zde dochází k chemické reakci, proto již nepatří mezi elektrostatické akumulátory.

Jedna z elektrod je často tvořena uhlíkovými sazemi či expandovaným grafitem, druhá elektroda se skládá z vodivých polymerů, avšak častěji z oxidů kovů s tunelovou strukturou např. polymery (polyanilin, polypyrol, aktivní uhlík), oxidy kovů (SnO_2 , MnO_2 , NiO). Tyto oxidy jsou schopny vratně přijímat a vydávat například ionty vodíku či lithia. Děj nabíjení a vybíjení lze ukázat na rovnici (4.1). [23]



Energie je uchována v chemické vazbě elektrodového materiálu, jak lze zhlédnout na Obr 4-3 včetně náhradního schématu, tudíž kapacita superkapacitoru je dána elektrochemickou kapacitou elektrody tvořené oxidem kovu.



Obr. 4-3 Princip uložení náboje a náhradní schéma superkapacitoru [23]

Elektrolyt je tvořen převážně směsí rozpouštědla a rozpustné soli. Jeho funkcí je transport nabitých částic superkapacitorem. Zásadním parametrem elektrolytu je potenciálové okno a odpor.

Obecně se u superkapacitoru používají dva druhy elektrolytů. Jedním z nich jsou vodné roztoky kyselin a alkálií, které mají vyšší vodivost a potenciálové okno 1 V. Dále lze použít aprotické elektrolyty tvořené organickými rozpouštědly typu propylen karbonát, etylen karbonát, sulfolan a solemi LiClO_4 , Et_4NPF_6 , Bu_4NPF_6 . Rozsah pracovního napětí je u těchto elektrolytů do 4 V. [23]

Srovnání vlastností akumulátoru, kondenzátoru a superkapacitoru

Tab. 4-1 zobrazuje v řádech základní rozdíly mezi kondenzátory, superkapacitory a akumulátory.

Tab. 4-1 Porovnání vlastností akumulátorů a kondenzátorů [24]

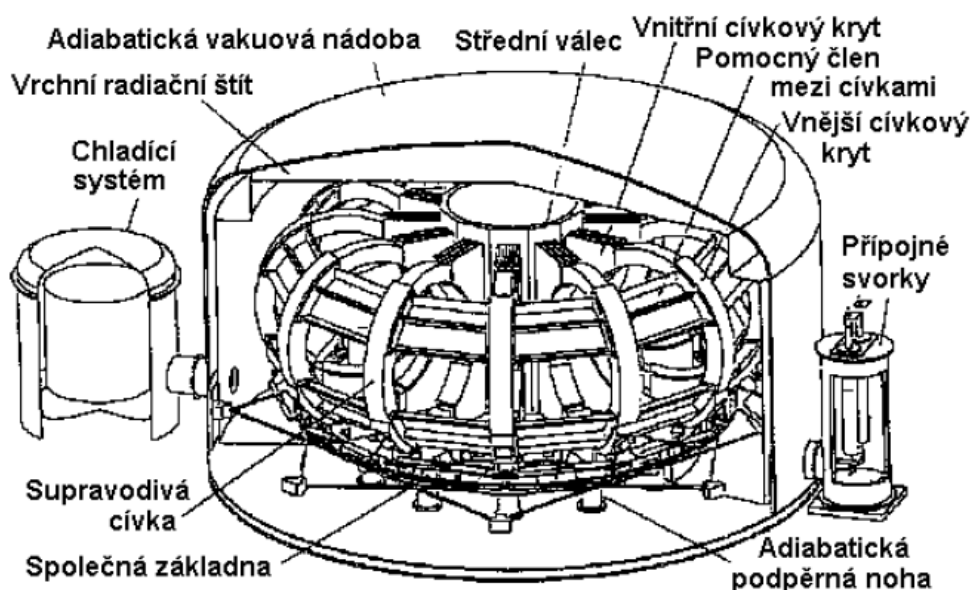
Parametr	Akumulátor	Kondenzátor	Superkapacitor
Měrná energie [Wh/kg]	100	0,2	10
Měrný výkon [kW/kg]	1	500	10
Doba nabíjení [s]	5 h	0,001	10
Životnost [počet cyklů]	1000	1 000 000	1 000 000

4.2 Elektromagnetický akumulátor (SMES)

Představitelem této skupiny akumulátorů je systém tzv. SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). Zde je energie uložena v magnetickém poli supravodivé cívky protékané proudem. Energie uložená v cívce lze vyjádřit vztahem (2.10), kde L představuje indukčnost cívky a I protékající proud cívkou. Ze vztahu je patrné, že energie roste s kvadrátem proudu, proto je velice důležité dosáhnout velké proudové hustoty daného vodiče, z něhož je cívka zhotovena. Nejlepší parametry pro tento účel splňují supravodivé materiály, které poskytují vynikající vlastnosti jako je neměřitelná rezistence a zároveň absolutní diamagnetismus.

Supravodiče můžeme rozdělit z hlediska pracovní teploty na dvě skupiny a to na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Mezi nízkoteplotní supravodiče zařazujeme vodiče zhotoveny z Pb, Sn, Hg, případně slitin Nb-Ti, Nb-Sn aj. Kritická teplota nízkoteplotních supravodičů se pohybuje blízko absolutní nule okolo 4 K. Z tohoto důvodu se jako chladicí médium používá tekuté hélium.

Vysokoteplotní supravodiče se dále dělí na vodiče typu první generace (označovány MFC – více vláknové vodiče), kde hlavními představiteli jsou sloučeniny typu bismut – stroncium – vápník-kysličník mědi BSCCO, např. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ označovány BSCCO 2223 nebo $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$ BSCCO 2212. Kritická teplota těchto supravodičů se pohybuje okolo 110 K. Supravodiče druhého typu CCC (vodiče s povlakem) představují sloučeniny typu YBCO, např. $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO 123) s $T_c = 70 \text{ K}$. [3], [21]



Obr. 4-4 Principiální návrh supravodivé cívky 360 MJ (Toroid) [3]

SMES akumulátory je možno navrhnout ve dvou variantách, z čehož první představuje solenoidní cívku a druhý toroidní cívku Obr. 4-4. Solenoid se vyznačuje nižší cenou, menší kapacitou a nehomogenním magnetickým polem na koncích cívky, naopak toroid eliminuje nehomogenitu, ale je dražší. SMES systémy disponují vysokou účinností dosahující více jak 95 %. Hlavním činitelem ztrát je kryogenní systém zabezpečující teplotu nižší než kritickou pro použitý supravodič. Další výhoda

spočívá v dynamickém náběhu systému, což lze s výhodou uplatnit pro stabilizaci sítě, také životnost se pohybuje v desítkách let a miliónech cyklů. Velkou nevýhodou SMES systémů je jejich finančně náročná konstrukce a malá hustota energie. Uplatnění nacházejí převážně v malých podnicích vyžadujících stabilní síť. SMES se vyrábějí v řádech 1 kWh tzv. mikro-SMES až 1 MWh, dokonce byly realizovány návrhy 1000 MWh SMES akumulátorů, ale z důvodu obrovských nákladů sestaveny nebyly. [3], [25], [21]

5. Mechanické akumulátory

Elektrickou energii lze poměrně dobře uskladnit pomocí mechanických akumulátorů. Základní z nich je například transformace elektrické energie na energii potenciální. Typickou aplikací využívající potenciální energie je přečerpávací elektrárna. Další možný způsob je uchování energie pomocí tlaku tedy systémem stlačený vzduch CEAS. Zajímavou možností akumulace přináší systém uchovávající energii kinetikou tzv. setrvačník.

5.1 Přečerpávací elektrárny (PVE)

Tento druh elektráren lze zařadit do kategorie velkoobjemových akumulátorů využívajících ke své činnosti potenciální energii. PVE se skládá ze dvou nádrží, jedna je převážně na vyvýšeném místě, druhá naopak v údolí. Celá funkce je založená na jednoduchém principu. Pokud je energie přebytek, voda je čerpána ze spodní nádrže do horní, kde tvoří potenciální zásobu energie. V době potřeby je hnána zpětně přes turbínu spojenou s generátorem. S určitou ztrátou dostaneme zpětně elektrickou energii. Dříve se účinnost pohybovala okolo 50 %, novější typy disponují až 75 % účinností. Tyto vodní díla jsou pro energetiku velmi výhodná, protože dokážou levnou energii mimo špičku uskladnit a zpětně dodat jako drahou špičkovou energii. Problém PVE je její umístění, které musí splňovat mnoho podmínek. PVE musí být postavena v blízkosti toku, zároveň je podmínkou vyvýšené místo, kde je možno vytvořit poměrně velkou nádrž. Pro ČR jsou ideální místa již zužitkována, přehled těchto míst je shrnut v Tab. 5-1. Další nevýhodou je velmi malá hustota energie, kdy k získání 1 kWh je potřeba přečerpat 3,68 m³ vody do výšky 100 m. Tento aspekt činí PVE velmi nákladné pro výstavbu (uvádí se > 600 Euro/kWh dle podmínek). [21], [27]

Tab. 5-1 PVE v ČR [27]

PVE v ČR	Výkon	Spád	Rozloha horní nádrže
	[MW]	[m]	[ha]
Dlouhé stráně	650	532,7 – 488,7	15,4
Dalešice	480	90,7 – 60,5	482
Štěchovice	45	209,8 – 219,5	4,9
Černé jezero	1,5	247,7	18,43

PVE můžeme rozdělit do tří kategorií. První představuje PVE využívající pouze umělou akumulaci, kdy je spodní nádrž postavena na toku řeky a voda je čerpána do horní nádrže. Druhý způsob představuje PVE se smíšenou akumulací. Zde je horní nádrž tvořena přehradní hrází v korytě řeky. Přítok je zajištěn přirozeným tokem nebo čerpáním vody ze spodní nádrže. Třetí způsob využívá k akumulaci železobetonový píst pohybující se v podzemní šachtě. Jakmile je elektrické energie přebytek, voda je čerpána z prostoru nad pístem pod píst, který se zvedá, jakmile je potřeba energii dodat, tíhou pístu je voda hnána zpětně přes turbínu. Tímto systémem je problém akumulovat tak velké množství energie, jaké nám poskytují běžné PVE, ale není zde tak značné omezení z hlediska umístění. [21]

5.2 Systém stlačený vzduch (CEAS)

CEAS podobně jak PVE patří do skupiny velkoobjemových akumulátorů. Celý princip je založen na stlačování vzduchu v podzemních solných jeskyních nebo vytěžených dolech. Omezením se tedy stává množství takto vzniklých prostorů. CEAS nabízí poměrně malou účinnost, která nedosahuje 40 %. Hlavním činitelem ztrát se stává samotná komprese vzduchu. Ke ztrátám zde dochází hlavně z důvodu úniku tepla, jež vzniká samotnou kompresí vzduchu. Aby byl alespoň částečně tento neduh kompenzován, může být CEAS vybaven tepelným akumulátorem, případně se vzduch před vstupem do plynové turbíny přehřívá externím ohříváčem. Pokud by tak nebylo učiněno, mohlo by dojít vlivem expanze plynu a následnému podchlazení k poškození plynové turbíny vlivem námrazy. Využitím tepelného akumulátoru lze dosáhnout účinnosti blížíící se 50 %.

Systémy CEAS můžeme rozdělit na dvě skupiny. Představitelem první skupiny je systém využívající konstantní tlak. Pro dosažení konstantního tlaku se využívá protitlak vodní hladiny. Jedna nádrž je na povrchu, druhou je zásobník se vzduchem, obě jsou potrubím propojeny. Tlak je konstantní, jelikož je zde udržován vodním sloupcem. Pokud dochází ke kompresi vzduchu, voda je potrubím hnána do vrchní nádrže. V důlním prostoru tak vzniká větší prostor pro stlačený vzduch. Druhým způsobem je CEAS s proměnným tlakem. Zde je celý princip založen pouze na kompresi vzduchu. Tlak se při spotřebě vzduchu snižuje až na mezní hodnotu využitelnosti. [21]

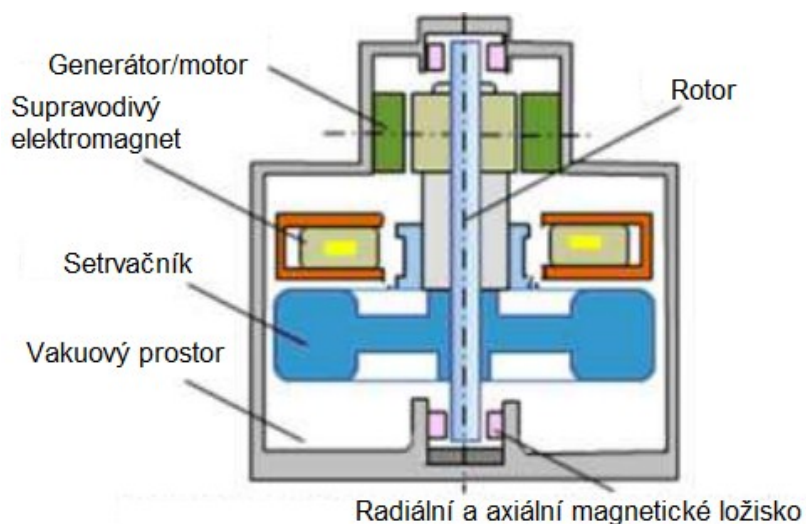
5.3 Setrvačnick

Setrvačníky jsou nejstarší akumulátory vůbec, principiálně se jedná o velice jednoduchý způsob akumulace energie. Využívá se zde momentu setrvačnosti tělesa pohybujícího se po kružnici. Obecně lze setrvačnick zařadit do skupiny akumulátorů s vysokou dynamikou náběhu, nižší hustotou energie a poskytující objemy energie v řádech jednotek kW až desítek MW.

V době přebytku energie je generátor v motorickém režimu a roztáčí setrvačnick na jmenovité otáčky. Naopak v případě potřeby energie je pomocí generátoru zpětně energie dodávána do sítě. Dodávaný výkon sítě je omezen pouze výkonem generátoru. Doba náběhu je téměř okamžitá.

Celková energie setrvačnicku roste s kvadrátem úhlové rychlosti, jak je patrné ze vztahu (2.9), proto je brán největší zřetel na tuto veličinu. U setrvačnicku se volí otáčky v řádech $10 \cdot 10^4$ - $10 \cdot 10^5$ $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

Setrvačníky se skládají ze samotného rotujícího tělesa, které je na společné hřídeli s generátorem. Uložení hřídele zajišťují axiální a radiální mechanická nebo magnetická ložiska. Celý systém bývá hermeticky uzavřen ve vakuu. Pro samotný setrvačnick jsou kladeny velké nároky na mechanické vlastnosti z důvodu vysoké úhlové rychlosti a tím související odstředivou silou. Materiály musí konstrukčně vydržet značné namáhání v tahu. Tyto kritéria splňují především plasty vyztužené skelnými vlákny označovanými GFRP nebo uhlíkovými vlákny CFRP, dříve se k tomuto účelu používalo slitin titanu. Další částí systému jsou již zmíněná mechanická nebo magnetická ložiska. Hlavním cílem je eliminovat ztráty třením, proto se vývoj schyluje využít magnetická ložiska tvořena elektromagnety, lépe však supravodivými elektromagnety. Axiální a radiální elektromagnety drží rotor ve svislém směru, supravodivá cívka vytvářející silné magnetické pole zajišťuje levitaci celého rotoru. Aby bylo docíleno téměř bezetrátového provozu, je vše uloženo ve vakuu, což eliminuje ztráty třením vzduchu o samotný setrvačnick. Samozřejmostí je, že do jisté míry nastává ztrátový faktor při chlazení supravodičů. Konstrukční uspořádání je uvedeno na Obr. 5-1. [21]



Obr. 5-1 Principiální schéma setrvačníku [21]

Setrvačník slouží nejčastěji ke stabilizaci sítě, kdy je schopen v řádu sekund dodávat výkon v řádech megawattů. Existují i systémy využívající setrvačník jako akumulační prvek stanic UPS. Snahou je uplatnit setrvačník do automobilového průmyslu, kde by sloužil k rekuperaci brzděné energie.

6. Metody multikriteriálního rozhodování

Dnešní prioritou z nepřeberné nabídky produktů či služeb se stává správné rozhodnutí. Někdy správné rozhodnutí není zcela jednoduché, jak by se na první pohled zdálo, ale je zcela zásadní, proto bylo pro tento případ vyvinuto několik specifických metod založených na matematických vztazích umožňujících číselného vyjádření. Toto nám umožní vidět variantu, jež je nejpravděpodobnější pro konkrétní účel z hlediska pohledu rozhodčí osoby. Pro účel návrhu akumulátoru určeného solárnímu systému byla vybrána metoda AHP, která je v následujících kapitolách podrobněji specifikována. [2]

6.1 Metody výpočtu vah kritérií

Metody určování vah kritérií můžeme dělit do čtyř skupin vyplývajících z maximalizačních znalostí nebo zjištěných faktech. Nicméně většina metod vyžaduje stanovení relativní důležitosti jednotlivých kritérií tzv. vah kritérií, které lze zobrazit vektorem \mathbf{v} (6.1).

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2 \dots v_n); \sum_{i=1}^k v_i = 1; v_i \geq 0 \quad (6.1)$$

- **Nominální informace o kritériích** – zde je specifikum absolutní neinformovanost a neznalost určených kritérií. Z tohoto důvodu se nejčastěji využívá technika stejné důležitosti kritérií.
- **Ordinální informace o kritériích** – pomocí ordinální informace již lze kritéria seřadit od nejdůležitějšího po nejméně důležité. Příkladem může být lexikografická metoda vycházející z principu, že největší vliv na výběr má nejdůležitější kritérium. Pokud existuje více stejně důležitých kritérií, následuje priorita druhého nejdůležitějšího kritéria atd.
- **Skalarizace ordinální informace o kritériích** – skalarizace představuje různé metody, jež umožní převést ordinální informaci na kardinální, čili nejen seřazení dle významnosti, ale i určení relativních významností v podobě vah.
- **Kardinální informace o kritériích** – pokud máme informaci o kritériu ve formě reálných čísel, které lze seřadit podle velikosti a významnosti, jedná se o kardinální informaci. Číselné ohodnocení jednotlivých kritérií můžeme získat normalizací váhy v_i .

[1]

6.1.1 Metody založeny na skalarizaci ordinální informace

Bodovací metoda a metoda pořadí

Předpokladem bodovací metody je schopnost uživatele určit ve stanoveném rozsahu kvantitativní hodnotu zvoleného kritéria. Hodnocení může být např. $w_i \in \langle 0 - 100 \rangle$, přiřazeno každému z kritérií. Čím je kritérium hodnotnější, tím je hodnota vyšší. Lze přiřadit kritériím i stejné hodnoty, čímž jim zavedeme stejnou váhu. Výpočet vah lze provést pomocí rovnice (6.2), kde v_i představuje váhu kritéria f_i .

$$v_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6.2)$$

S bodovací metodou úzce souvisí metoda pořadí. Zde jsou kritéria řazeny od nejpreferovanějšího s číslem $m = w_i$, které odpovídají počtu kritérií. Druhému v pořadí náleží hodnota $m-1$ a nejméně preferovanému patří hodnota 1. Výpočet preference jednotlivých kritérií je proveden dle vzorce (6.2), kde jmenovatel je dopočetn vztahem (6.3).

$$\sum_{i=1}^m w_i = \frac{m \cdot (m+1)}{2} \quad (6.3)$$

Fullerová metoda

Fullerova metoda je založena na párovém porovnání kritérií řazených schematicky do trojúhelníku. Nezáleží zde na pořadí významnosti. Pro názorné zobrazení je využito značení kritérií 1 až m . V prvním řádku ve dvojici řádku trojúhelníku je kritérium 1, v druhém řádku pak pořadí ostatních kritérií. Analogicky je tento postup aplikován až do vyčerpání všech variant kritérií. Posléze jsou označena preferovaná kritéria dvojic. Příkladné schéma zobrazuje Obr. 6-1.

	<div>1</div>	1	<div>1</div>
	2	<div>3</div>	m
		<div>2</div>	<div>2</div>
		3	m
			<div>$m-1$</div>
			m

Obr. 6-1 Fullerův trojúhelník

Výsledná váha v_i kritéria f_i je dána vztahem (6.4), kde n_i představuje počet preference konkrétního kritéria nad ostatními (označený počet preferencí) a N je celkový počet porovnaných dvojic vypočten vztahem (6.5).

$$v_i = \frac{n_i}{N} \quad (6.4)$$

$$N = \frac{k \cdot (k - 1)}{2} \quad (6.5)$$

Saatyho metoda

Je označována jako kvantitativní metoda párového srovnání. Jak je zmíněno již výše, tato metoda je využívána nejčastěji a používá se jako referenční pro srovnání s jinými postupy. Základem Saatyho metody je matice párového porovnání S (6.7), kde na rozdíl od metody Fullerovy není určena jen preference jednoho kritéria nad druhým, nýbrž i o kolik je lepší. Prvky matice $S = \{s_{ij}\}$ vyjadřují poměr vah v_i a v_j .

Poměr se zpravidla určuje stupnicí $s_{ij} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ viz. Tab. 6-1. Matice S je reciproká, proto musí platit vztah (6.6).

$$s_{ij} = \frac{1}{s_{ji}} \quad (6.6)$$

Tab. 6-1 Hodnocení kritérií dle Saatyho

Počet bodů	Preference
1	Kritéria stejně významná
3	První kritérium slabě významnější
5	První kritérium podstatně významnější
7	První kritérium prokazatelně významnější
9	První kritérium podstatně významnější

$$S = \begin{bmatrix} 1 & s_{12} & \cdots & s_{1j} \\ 1/s_{12} & 1 & \cdots & s_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/s_{1i} & 1/s_{2i} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

[1]

Saatyho metoda je založena na výpočtu vlastního vektoru odpovídajícího maximálnímu vlastnímu číslu matice párového porovnání S podle vztahu (6.8), kde λ_{max} je maximální vlastní číslo a x je vlastní vektor.

$$S \cdot x = \lambda_{max} \cdot x \quad (6.8)$$

Výsledné váhy v_i jsou pak dopočteny vztahem (6.9).

$$v_i = \frac{x_i}{\left(\sum_{i=1}^m x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6.9)$$

Jedním z problémů, jež se řeší při výpočtu kritérií dle Saatyho metody, je konzistence matice S . Konzistence je vyjádřena konstantou I_s , která je vypočtena dle vzorce (6.10) a udává nesrovnalosti při vyplnění matice S . Jinými slovy, jak moc si hodnoty kritérií protiřečí.

$$I_s = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} \quad (6.10)$$

Index λ_{max} je maximální vlastní číslo a m představuje počet kritérií. Pokud je index konzistence roven 0, matice je plně konzistentní. Plná konzistence je v praxi téměř výhradně výjimkou. Matice je uspokojivě konzistentní pokud je $I_s < 0,1$.

Metoda nejmenších čtverců

Předpokladem této metody je stanovení váhy v_i na základě minimalizace součtu kvadrátů odchylek prvků matice od příslušných podílů vah podle vztahu (6.11). Tato metoda je univerzálnější a je založena na stejném principu jak Saatyho metoda. Matice S již nemusí být reciproká a není již potřeba hodnocení dle devítibodové stupnice porovnání.

$$\sum_i \sum_j \left(s_{ij} - \frac{v_i}{v_j} \right)^2 \rightarrow \min; \quad (6.11)$$

Metoda geometrického průměru

U této metody se hledají takové váhy v_i , které minimalizují součet kvadrátů logaritmů odchylek prvků matice párových porovnání od příslušných logaritmů podílů vah jednotlivých kritérií.

$$F(v_1, v_2, \dots, v_m) = \sum_i \sum_j (\ln s_{ij} - (\ln v_i - \ln v_j))^2 \rightarrow \min; \quad (6.12)$$

za podmínky

$$\sum_{j=1}^m v_j = 1, \quad v_i \geq 0; \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (6.13)$$

V explicitním tvaru lze zjednodušeně zobrazit výpočet vztahem (6.14). Váha i -tého kritéria se vypočte jako geometrický průměr odhadů s_{ij} poměrů významnosti všech kritérií k i -tému kritériu, normovaný součtem geometrických průměrů stejně vypočtených pro všechna kritéria.

$$v_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^m s_{ij} \right)^{\frac{1}{m}}}{\sum_{i=1}^m \left(\prod_{j=1}^m s_{ij} \right)^{\frac{1}{m}}}; \quad i = (1, 2, \dots, m) \quad (6.14)$$

6.1.2 Metody založeny na kardinální informaci

Normalizace

Pokud $f_i \in L_{k-1}$ na množině L_k , je maximalizačním kritériem a nabývá pouze kladných hodnot, pak lze napsat vztah (6.15). Pro normalizaci je typická transformace původní hodnoty kritéria do jednotkové škály $[0,1]$. $G_i(a)$ představuje normalizované kritérium.

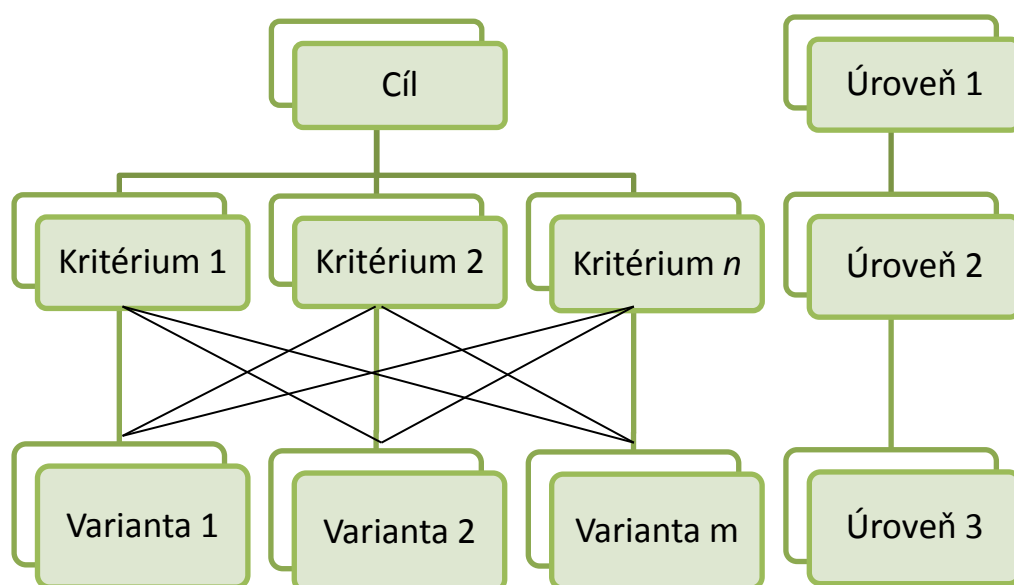
$$G_i(a) = \frac{f_i(x)}{\sum_{j=1}^m f_i(x_j)}, \quad x \in L_k \quad (6.15)$$

Pro normalizaci platí:

$$\sum_{j=1}^m G_i(x_j) = 1 \quad (6.16)$$

7. Princip AHP

AHP (Analytic Hierarchy Process) představuje komplexní metodologii vyvinutou pro podporu rozhodování z výběru alternativ na základě empirických i konkrétních kritérií. Hlavním znakem AHP metody je rozklad složité nestrukturované situace na jednodušší komponenty, což je charakteristické pro hierarchickou strukturu, příkladně zobrazenou Obr. 7-1. [2]



Obr. 7-1 Zobrazení hierarchie metody AHP

- **Úroveň 1** – cíl vyhodnocení, může být i uspořádání variant
- **Úroveň 2** – kritéria vyhodnocování
- **Úroveň 3** – posuzované varianty

Hierarchické struktury mohou být daleko složitější, nicméně pro zvolenou aplikaci postačí uspořádání zobrazeno Obr. 7-1.

7.1 Postup výpočtu

Sestavení hierarchické struktury

Základem se stává uvědomění, jaké informace hodnotících komponent máme k dispozici a jaký charakter informací nám nabízí jednotlivá kritéria. Seskupíme tedy jednotlivé prvky do disjunktích množin, kde prvky jedné množiny ovlivňují prvky druhé množiny. Prvky, jež jsou součástí stejné úrovně nebo množiny, jsou na sobě nezávislé.

Stanovení vah kritérií

Váhy kritérií určíme pomocí postupů zobrazených v kapitole č. 6, kde se Saatyho metoda považuje za výchozí a referenční.

Stanovení vah variant

Výpočet vah variant pro metodu AHP je totožný s postupy výpočtu vah kritérií. Pro každé kritérium se sestaví Saatyho matice variant (7.1) a stejným způsobem se určí preference jednotlivých variant vůči sobě.

$$U = \begin{bmatrix} 1 & u_{12} & \cdots & u_{1j} \\ 1/u_{12} & 1 & \cdots & u_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/u_{1j} & 1/u_{2j} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Posledním krokem rozhodovacího procesu AHP je stanovení optimální varianty. Máme k dispozici váhy jednotlivých kritérií v_j a váhy variant u_{ij} . Na základě těchto znalostí se výsledné váhy U_i dopočtou vztahem (7.2). Výsledek lze reprezentovat seřazením dle preference jednotlivých variant.

$$U_i = \sum_{j=1}^k u_{ij} \cdot v_j, \quad (7.2)$$

7.2 Seznámení se softwarovým produktem Expert Choice (EC)

EC byl vyvinut ve spolupráci s T. L. Saatym. Jedná se o softwarový produkt využívající již diskutovanou metodu vícekritériálního rozhodování AHP. Tento účinný systém pro podporu rozhodování poskytuje uživatelský přístup k rozhodovací problematice a zjednodušuje pochopení mnohdy složité rozhodovací struktury. EC umožňuje grafického zobrazení problematiky a zároveň uživatele intuitivně navádí. Pro zpřehlednění se provádí rozdělení do stromové struktury. Jednotlivá kritéria se sestavují do rozhodovacích matic, jež lze zadat číselně, graficky či verbálně. Stejně možnosti poskytují i jiné úrovně hierarchie. Výsledné hodnocení je zobrazeno pomocí grafů nebo číselně a poskytuje možnost změny vah kritérií s okamžitou informací o změně preferencí. [2]

8. Stanovení optimálního akumulátoru pro solární systém pomocí EC

Abychom mohli provést porovnání akumulátorů, je potřeba určit, zdali je pro danou aplikaci proveditelný, ekonomicky dostupný a výhodný. Výběr bude proveden pro sestavu solárních panelů o výkonu 40 kWp. V první řadě vyloučíme akumulační systémy, které jsou pro tuto chvíli a aplikaci nerentabilní a velice nákladné. Do této skupiny zařadíme: vodíkové systémy, SMES, kondenzátory a superkondenzátory. Pro solární systémy v řádech kWp se také nepovažuje jako ideální akumulační prvek CEAS a PVE. Akumulátory kov-vzduch ač disponují dobrými vlastnostmi, jsou stále ještě ve vývoji. Z tohoto hlediska je budeme také považovat za nevhodné.

8.1 Návrh porovnávaných variant akumulátorů

Pro optimální provoz solárního systému dodávajícího energii do sítě je nutno čelit několika zpětným vlivům.

- **Dynamický jev** – je typický rychlými poklesy a nárůsty výkonu vlivem procházející oblačnosti. Jedná se o výkyvy výkonu v řádech sekund – minut.
- **Přebytkový jev** – zde dochází k přebytku energie, což může způsobovat v síti přechod na vyšší úroveň napětí.

Vlivem těchto poznatků se nabízí několik variant akumulátorů, které jsou schopny odolávat těmto vlivům. Akumulátory, o kterých lze uvažovat pro tuto aplikaci, nalezneme včetně jejich vlastností v Tab. 8-1. Samozřejmě nelze objektivně všechny parametry porovnat, jelikož ne všechny lze číselně vyjádřit nebo je mezi jednotlivými variantami porovnat.

Tab. 8-1 Vlastnosti srovnávaných akumulátorů [9], [12], [21], [29],

Typ	Účinnost	Počet cyklů	Životnost	Reakční doba	Samovybíjení	Cena	Měrný výkon	Měrná energie
	[%]	[-]	[let]	[s]	[%]	[Kč·kWh ⁻¹]	[W·kg ⁻¹]	[Wh·kg ⁻¹]
Li-ion	95	8000	20	0,05	5	11000	280	130
Pb	75	1000	10	0,05	3	6500	600	30
Na-S	90	2500	10	0,05	100	15000	200	150
VRB	80	12000	15	0,5	2	18000	20	25
Ni-Cd	65	2000	20	0,05	20	25000	60	40

Pro vypočtení preference variant je potřeba stanovit, zdali jsou hodnoty kritéria maximalizační nebo minimalizační. Z Tab. 8-2 je patrné rozdělení kritérií. Za minimalizační kritérium je považováno to, u kterého je menší hodnota považována za lepší. Naopak maximalizační kritérium je považováno za lepší v případě vyšší hodnoty.

Tab. 8-2 Dělení kritérií dle funkce

Maximalizační	Účinnost	Počet cyklů	Životnost	Měrný výkon	Měrná energie
Minimalizační	Reakční doba	Samovybíjení	Cena		

Tab. 8-3 zobrazuje váhy jednotlivých variant po normalizaci. Je zde již zohledněno rozdělení kritérií dle Tab. 8-2.

Tab. 8-3 Váha variant po normalizaci

	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8
Li-ion	0,235	0,314	0,267	0,244	0,183	0,223	0,241	0,347
Pb	0,185	0,039	0,133	0,244	0,305	0,378	0,517	0,08
Na-S	0,222	0,098	0,133	0,244	0,009	0,164	0,172	0,4
VRB	0,198	0,471	0,2	0,024	0,457	0,137	0,017	0,067
Ni-Cd	0,160	0,078	0,267	0,244	0,046	0,098	0,052	0,107

8.2 Preference kritérií

Pro stanovení optimální varianty je potřeba seskupit všechny dostupné informace, které lze získat pro jednotlivé typy akumulátorů. Zde dochází k určitému problému, kdy pravdivost a objektivnost získaných informací není zcela přesná a odvíjí se zpravidla od konkrétní nabídky, ceny a technologie výroby. V rámci subjektivního pohledu bude brán při volbě preference kritérií na tuto skutečnost ohled. Další faktor ovlivňující výběr akumulátoru je charakter ukládané energie, jinými slovy, zda se bude jednat o výkonový nebo energetický typ akumulátoru.

Již zmíněné vlastnosti solárních systémů zapříčiňují výběr akumulátoru, který dokáže pracovat v energetickém a částečně výkonovém režimu, tedy schopnost reagovat na výkyvy výkonu a zároveň pojmout dostatečné množství energie pro regulační činnost. Tab. 8-4 zobrazuje na základě subjektivního pohledu Saatyho matici, z níž jsou určeny váhy kritérií a následně zobrazeny na Obr. 8-1. V Tab. 8-5 jsou jednotlivá kritéria popsána.

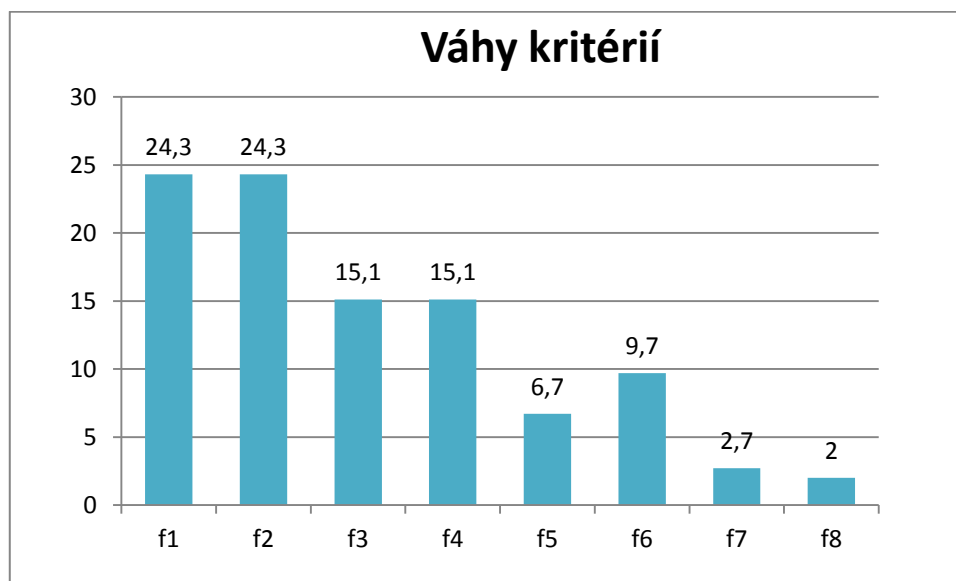
Tab. 8-4 Zobrazení Saatyho matice S pro zvolená kritéria

	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8
f1	1	1	2	2	4	3	7	8
f2	1	1	2	2	4	3	7	8
f3	1/2	1/2	1	1	3	2	6	7
f4	1/2	1/2	1	1	3	2	6	7
f5	1/4	1/4	1/3	1/3	1	1/2	4	5
f6	1/3	1/3	1/2	1/2	2	1	5	6
f7	1/7	1/7	1/6	1/6	1/4	1/5	1	2
f8	1/8	1/8	1/7	1/7	1/5	1/6	2	1

Tab. 8-5 Popis kritérií

f1	účinnost	f5	samovybíjení
f2	počet cyklů	f6	cena
f3	životnost	f7	měrný výkon
f4	reakční doba	f8	měrná energie

Konzistence kritériální matice je rovna 0,02, čili můžeme tuto matici označit za dostatečně konzistentní.

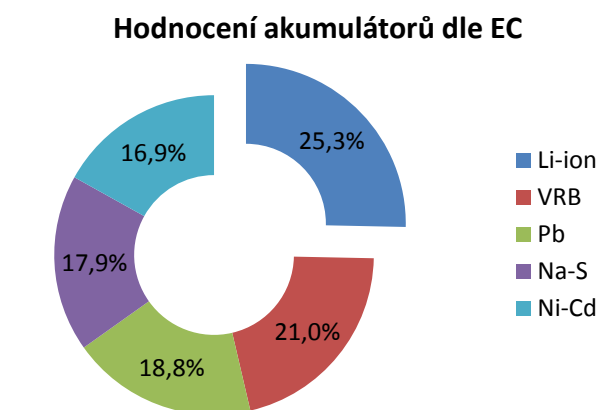


Obr. 8-1 Zobrazení vah kritérií dle EC

Podle Obr. 8-1 můžeme říci, že největší ohled je brán na účinnost a počet pracovních cyklů, protože pro využití solární energie nelze uvažovat s velkými ztrátami a je brána v potaz vyšší cykličnost. Další kritéria jako životnost a reakční doba jsou také považována za velmi důležitá, nicméně životnost je závislá na počtu cyklů a režimu nabíjení, proto je kritérium hodnoceno nižší preferencí. Reakční doba je důležitá hlavně z hlediska výkonové akumulace, čím rychlejší reakční doba, tím je možná kvalitnější dodávka energie. Samovybíjení zde nepředstavuje velký ztrátový faktor, jelikož se jedná o akumulaci v denních cyklech, přísluší zde nižší preference. Ne zcela zanedbatelným kritériem je pořizovací cena, ale uvedené ceny nejsou zcela věrohodné a pohybují se ve velkých rozmezích. Z tohoto důvodu je preference zadána nižší hodnotou. Poslední kritéria popisují akumulátor z hlediska měrného výkonu a měrné energie, ale jelikož se jedná o staniční typ baterie, není zde brán velký ohled na preference.

8.3 Výsledné hodnocení dle EC

Dle zvolených podmínek a hodnocení kritérií vyšel jako nejvhodnější akumulátor Li-ion. Na obr. 8-2 lze vidět výsledné uspořádání variant. Li-ion dominuje hlavně díky vysoké účinnosti a životnosti.



Obr. 8-2 Výsledné hodnocení dle EC

Jelikož Li-ion akumulátor dle hodnocení AHP je považován za nejvhodnější, bude v následující kapitole využit při návrhu akumulátoru ve spojení s FVE.

9. Návrh akumulčního systému pro FVE

Návrh akumulátorů bude proveden pro FVE s parametry uvedeny v Tab. 9-1 na základě měsíčního záznamu měřených veličin. V ideálním případě je vhodné zpracovat data z celoročního měření, nicméně měřená data reprezentují rozmanité stavy a lze je považovat za dostačující.

Tab. 9-1 Parametry FVE

Typ	Monokrystal
Jmenovitý výkon	40 kW/400 V
Měřená data	13. 5. 2011 – 19. 6. 2011

Instalovaná FVE může přinášet pro danou lokalitu určité nežádoucí zpětné vlivy, jako jsou např. odchylky napájecího napětí, harmonické zkreslení napětí, činitel dlouhodobého vjemu flikru, rychlé změny napětí, nesymetrie napětí. V následujících kapitolách je míra těchto vlivů zhodnocena.

9.1 Hodnocení kvality sítě s FVE 40 kWp dle ČSN EN 50160

Měřená data pro analýzu jsou použita z ČEZ Distribuce, a.s., která byla měřena zaměstnanci provozovatele v intervalu 13. 5. 2011 12:25 až 20. 6. 2011 8:04. Vyhodnocení kvality napětí dle ČSN EN 50160 pro místo připojení bylo dodáno pro týdenní interval 13. 5. 2011 až 20. 5. 2011.

9.1.1 Odchylky napětí

Dle běžných provozních podmínek musí být průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí pro měřicí intervaly 10 minut v rozsahu + 10 % a – 10 % napětí. Pro zvolené období lze vidět extrémy těchto hodnot v Tab. 9-2.

Tab. 9-2 Extrémy napětí

Napětí 100 %	L1	L2	L3
Průměr	234,9	231,8	234,1
Maximum	251,9	248,7	246,5
Minimum	221,9	214,0	224,6
Napětí 95 %	L1	L2	L3
Průměr	234,2	231,2	233,6
Maximum	247,3	244,1	241,3
Minimum	222,0	216,0	224,6

Mezní hodnoty pro fázové hodnoty napětí 230 V jsou max. 253 V, min. 207 V. Jak lze vidět z Tab. 9-2, tyto hodnoty překročeny nebyly.

9.1.2 Harmonické zkreslení napětí

V Tab. 9-3 jsou uvedeny mezní hodnoty průběhu **THD U** jednotlivých fází. Limit pro tuto veličinu je 8 %.

Tab. 9-3 Extrémy THD U

THD 100 %	L1	L2	L3
Průměr	1,19	1,64	1,38
Maximum	1,98	2,63	2,10
Minimum	0,75	1,08	0,84
THD 95 %	L1	L2	L3
Průměr	1,17	1,60	1,35
Maximum	1,60	2,23	1,82
Minimum	0,75	1,08	0,84

Z Tab. 9-3 je patrné, že tato mezní hodnota není nadlimitní.

9.1.3 Dlouhodobý flikr PIt

Míra dlouhodobého vjemu flikru musí být 95 % času, v libovolném týdenním období, menší nebo rovno 1, tedy $P_{It} \leq 1$.

Obecně je problém určit zda jsou nadlimitní hodnoty flikru způsobeny samotným zdrojem, v tomto případě fotovoltaickou elektrárnou, nebo se jedná o pozadí sítě, kdy FVE pouze svou funkcí přispívá ke zvýraznění těchto nadlimitních hodnot.

Obecné předpoklady pro stanovení závěrů vlivu FVE na síť z hlediska flikru nelze z dostupných dat stanovit, což platí pro všechny lokality, kde jsou hodnoty flikru trvale překračovány.

Tab. 9-4 Extrémy Flikr PIt

Flikr 100 %	L1	L2	L3
Průměr	0,95	0,91	0,91
Maximum	2,51	2,92	4,95
Minimum	0,38	0,19	0,22
Flikr 95 %	L1	L2	L3
Průměr	0,88	0,81	0,81
Maximum	2,08	2,42	2,31
Minimum	0,38	0,19	0,22

Z Tab. 9-4 lze vidět, že hodnoty jsou trvale překračovány.

9.1.4 Rychlé změny napětí

Normou ČSN 50160 je definováno podpětí, pokud poklesne jmenovité napětí pod 90 %, přepětí je pak určeno 110 % jmenovitého napětí.

Tab. 9-5 Rychlé změny napětí

Statistika	L1	L2	L3	Vývod celkem
Počet poklesů	0	0	0	0
Počet přepětí	515	0	0	515
Počet přerušení	0	0	0	0
Počet událostí	515	0	0	515
Celková doba poklesů	0:00	0:00	0:00	0:00
Celková doba přepětí	5:25	0:00	0:00	5:25
Celková doba přerušení	0:00	0:00	0:00	0:00
Celková doba událostí	5:25	0:00	0:00	5:25

Z uvedených hodnot v Tab. 9-5 plyne, že hodnoty napětí jsou trvale překračovány.

9.1.5 Frekvence

Tab. 9-6 zobrazuje naměřené hodnoty frekvence v porovnání s normou ČSN 50160. Z analýzy lze stanovit, že hodnoty frekvence se pohybují v povolených mezích.

Tab. 9-6 Hodnoty frekvence

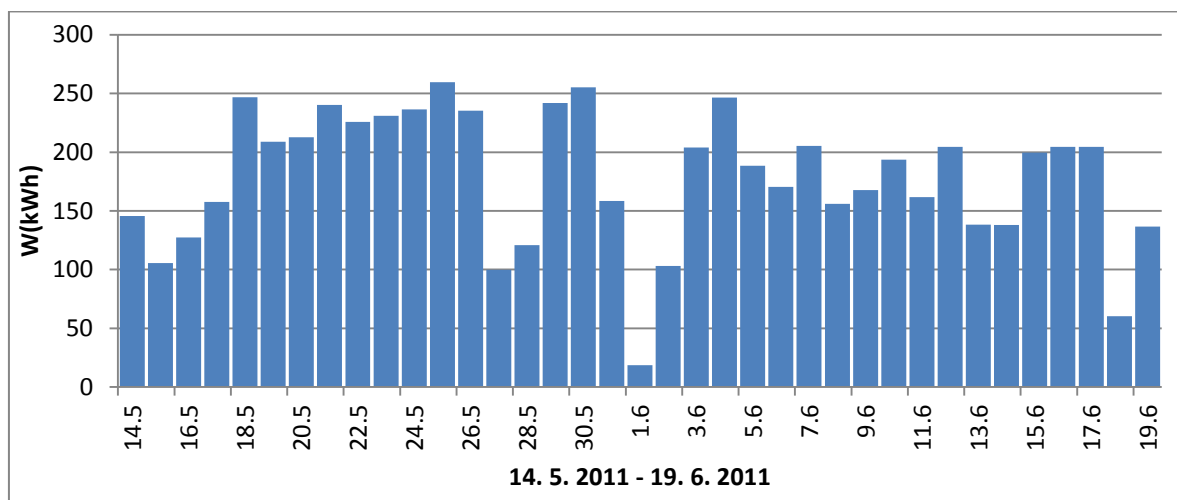
Veličina	EN 50160	Hodnoty (Mimo mez)
Délka měření	1 týden	20 dnů
Interval záznamu	10 minut	10 minut
Frekvence 99,5 % roku	50 Hz + 1 % - 1 %	49,94 - 50,06 /0 %
Frekvence 100 % roku	50 Hz + 4 % - 6 %	49,94 - 50,08 /0 %
Nesymetrie 95 %	2,0 %	0,07 - 1,17 % /0 %

9.1.6 Nesymetrie napětí

Limit pro nesymetrii napětí je 2 %. Ve sledovaném období se nesymetrie pohybovala v intervalu 0,12 – 1,16 % pro 95 % interval změřených hodnot. Maximální hodnota nesymetrie dosáhla 1,9 %. Z hlediska nesymetrie napětí nebyl shledán problém.

9.2 Výkonové poměry FVE pro danou lokalitu bez akumulace

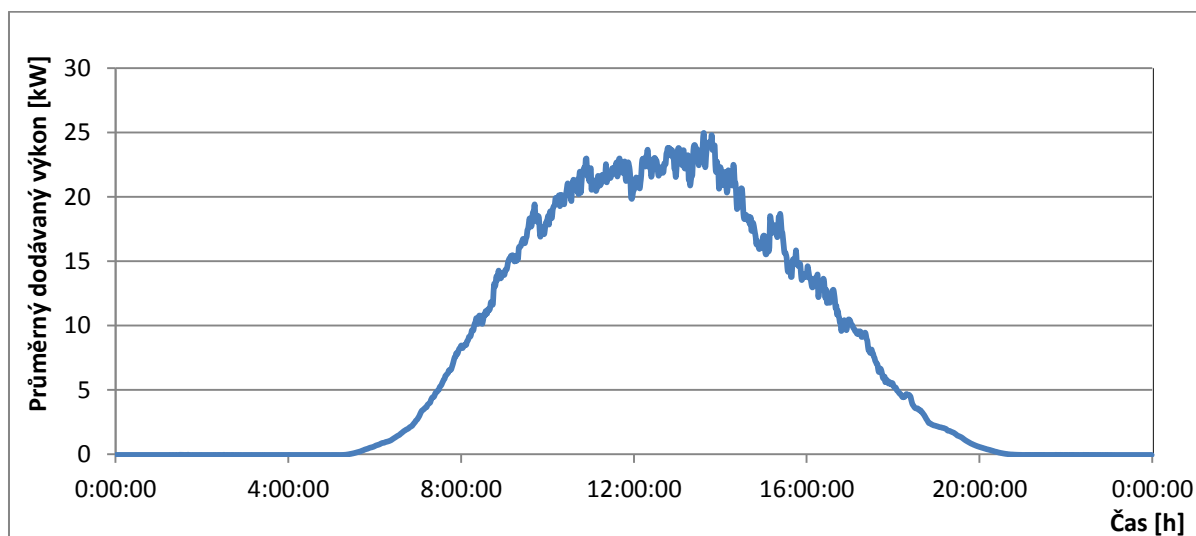
Pro sledované období je na Obr. 9-1 zobrazená denní dodaná energie FVE do sítě. V Tab. 9-7 jsou zobrazeny maximální, minimální a průměrné hodnoty dodávaného výkonu a energie FVE. Obr. 9-2 pak zobrazuje průměrný dodávaný výkon FVE pro celé měřené období.



Obr. 9-1 Vyrobená elektrická energie pro jednotlivé dny sledovaného období

Tab. 9-7 Parametry FVE

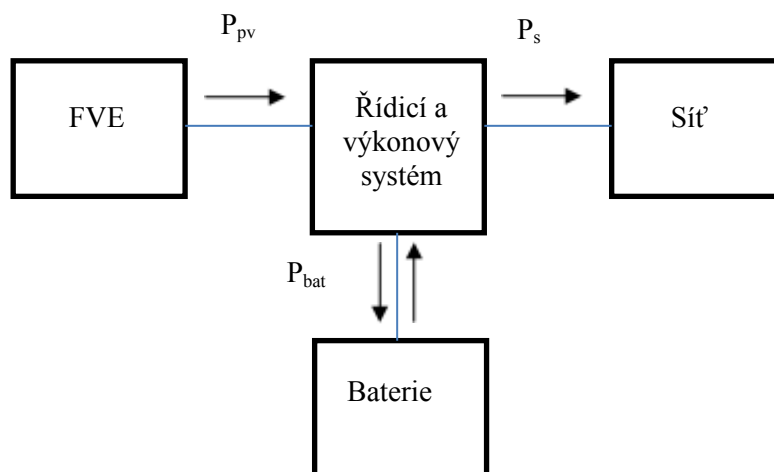
Měřené období	14. 5. 2011 – 19. 6. 2011
Průměrná hodnota vyrobené energie (kW·h)	179,6
Maximální vyrobená energie (kW·h)	259,7
Minimální vyrobená energie (kW·h)	18,6
Průměrná hodnota dodaného výkonu (kW)	12
Maximální výkon (kW)	34,8
Časový úsek dodávky P>0 (hh:mm)	13:55



Obr. 9-2 Průměrný dodávaný výkon FVE

9.3 Návrh akumulátoru pro energetickou akumulaci FVE 40 kWp

Pro eliminaci zmíněných vlivů lze uvažovat dva způsoby akumulace, energetickou a výkonovou. Úvaha této práce bude zaměřena na energetickou akumulaci.



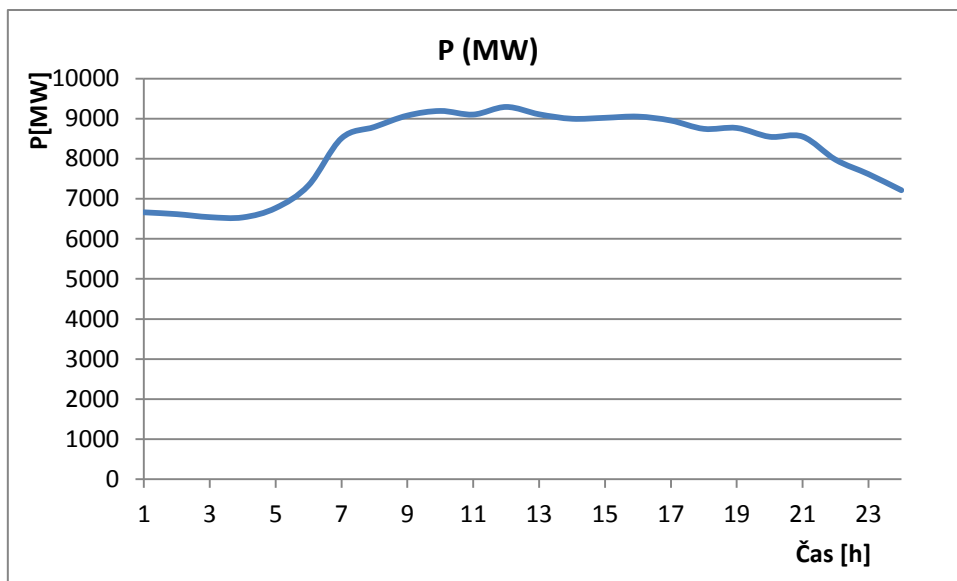
Obr. 9-3 Blokové schéma PVE s akumulací

Princip energetické akumulace spočívá v omezení negativních vlivů FVE na distribuční soustavu vlivem rovnoměrné dodávky výkonu. Funkce je založena na omezení dodávaného výkonu na určité hodnotě, kdy přebytečná energie nad stanovený limit je uskladněna v akumulátoru. V době, kdy již dodávka výkonu je pod stanoveným limitem, energie z baterie nadále udržuje konstantní limitní dodávaný výkon do doby vyčerpání naakumulované energie. Po vyčerpání této energie je baterie odpojena.

Tento typ akumulace umožňuje eliminovat rychlé nárůsty a propady výkonu a s tím související rychlé změny napětí. Jelikož předpokladem tohoto typu akumulace je dodávka konstantního výkonu po celou dobu dodávky, vliv FVE na příspěvky flikru je potlačen ne-li eliminován. Na Obr. 9-3 je vidět blokové schéma připojení FVE na síť.

9.3.1 Stanovení energie akumulátoru dle ideálního průběhu výkonu

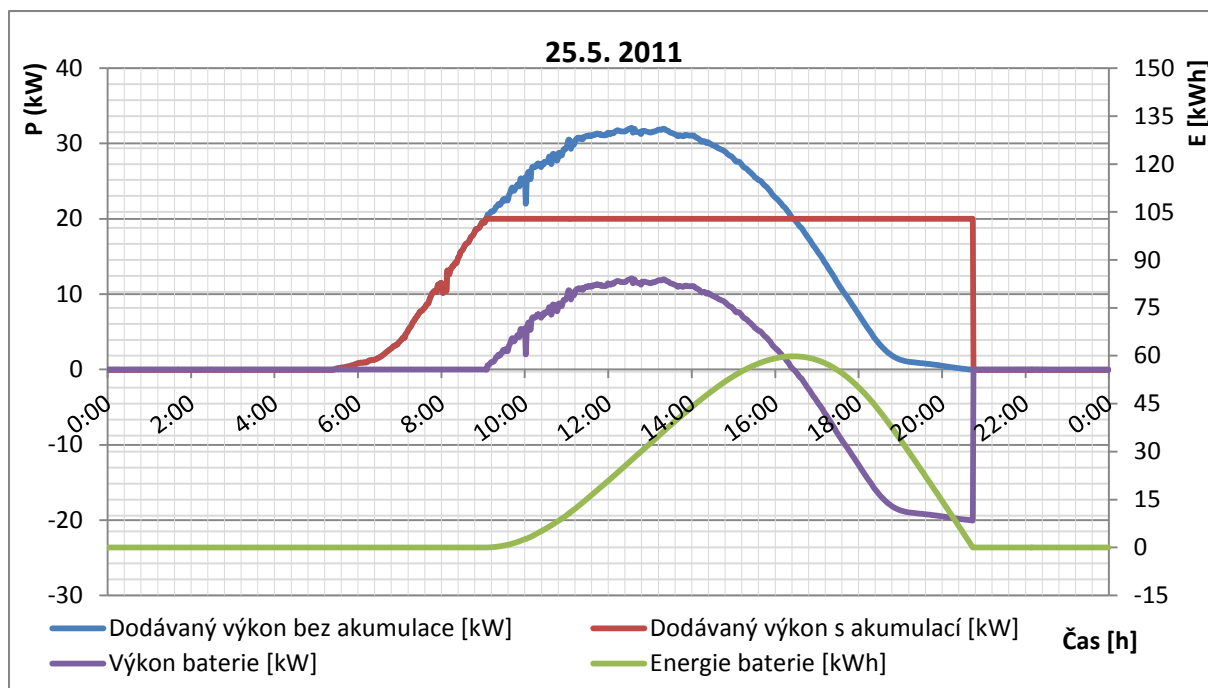
Pod ideálním průběhem si lze představit průběh výkonu za absolutně slunečného dne bez jakýchkoliv propadů či nárůstů výkonu a vysoké oblačnosti. Tento den, 25. 5. 2011 je zobrazen na Obr. 9-5. Akumulátor se zde účastní pouze zrovnoměnění dodávky energie do sítě. Vychází se z Obr. 9-4, kde je zobrazena denní spotřeba elektrické energie. Bohužel není k dispozici denní diagram zatížení lokality s instalovanou FVE, proto budeme vycházet z denního diagramu zatížení distribuční soustavy ČR pro den maximální spotřeby 3. 5. 2011 s předpokladem stejného trendu zatížení v daném období a dané lokalitě.



Obr. 9-4 Denní diagram zatížení 3.5 2011 [28]

Z Obr. 9-4 lze vidět, že k nárůstu spotřeby dochází okolo 7:00. Téměř konstantní spotřeba je v rozmezí 9:00 až 17:00, pak dochází k mírnému poklesu a kolem 21:00 spotřeba klesá znatelně. Samozřejmě je zde využit pouze demonstrativní případ a pro konkrétní lokalitu se může denní diagram zatížení podstatně lišit.

Pro simulaci dodávaného výkonu do sítě FVE s akumulací je využit jednoduchý algoritmus a jednotlivé grafy jsou simulovány v prostředí MS Excel.



Obr. 9-5 Simulace dodávaného výkonu FVE 40 kWp s akumulací 25. 5. 2011

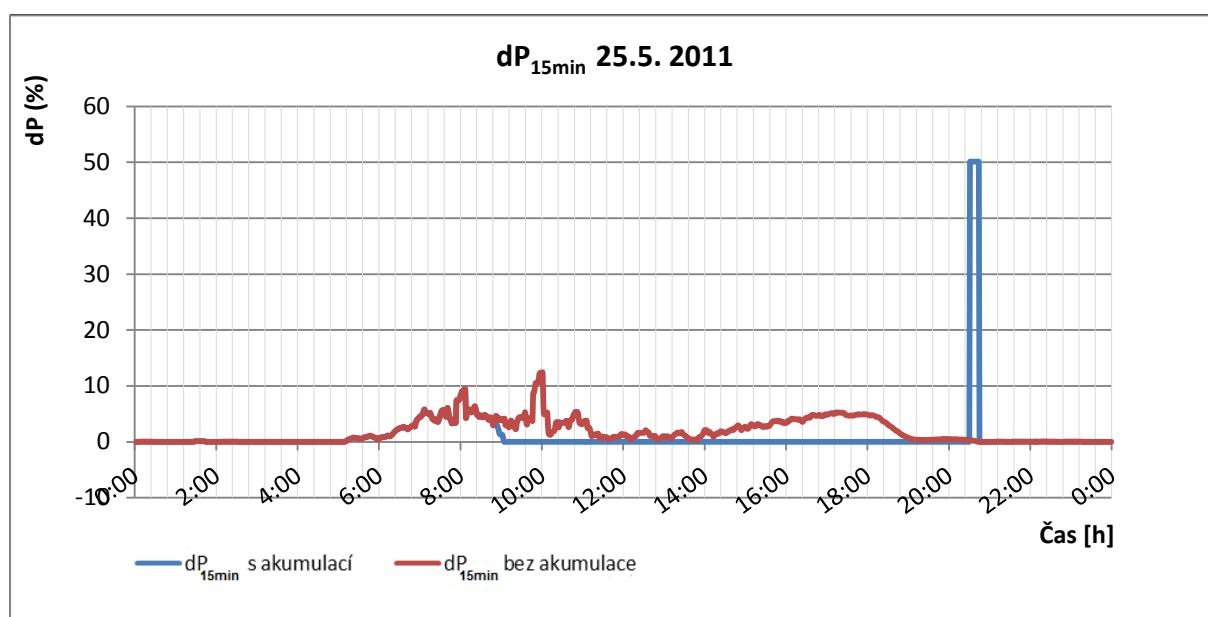
Na Obr. 9-5 je vidět, že limitní hodnota byla stanovena na 20 kW v době od 9:00. V této době dochází k dobíjení akumulátoru. V době od 17:00 již FVE není schopna dodat limitní výkon

a pro udržení této hodnoty je využit akumulátor. Dodávka elektrické energie pro tento režim trvá do 20:45, kdy dojde k vybití akumulátoru.

Tab. 9-8 Vlastnosti akumulátoru pro energetickou akumulaci

Energie baterie	Max. výkon dobíjení	Max výkon vybíjení	Max dP_{15min}
[kWh]	[kW]	[kW]	[%]
59,82	12,1	-20,05	50,125

V Tab. 9-8 je vidět maximální využitou kapacitu 59,8 kWh. Tuto energii akumulátoru je nutno dimenzovat o 15 % kapacity výš z hlediska hloubky vybití a o 20 % z hlediska snížení kapacity vlivem stárnutí a cyklování, čili 92 kWh s respektováním 65 % úrovně vybití. Max dP_{15min} definuje změnu výkonu během 15 minut vzhledem k jmenovitému výkonu.



Obr. 9-6 Změna výkonu dP_{15min} pro ideální průběh

Na Obr. 9-6 je vidět, že akumulace při odpojení baterií přináší změnu výkonu 50,125 %. Tuto poměrně velkou změnu lze eliminovat postupným vybíjením akumulátoru. Průměrná hodnota změny dP_{15min} je pro FVE bez akumulace 1,8 %, s akumulací 1 %.

9.3.2 Průběhy výkonu a energie akumulátoru v běžném provozu

Obecné stanovení kapacity akumulátoru závisí na zvolené limitní úrovni dodávaného výkonu. Tento limit nelze jednoznačně určit, jelikož závisí na charakteru dodávaného výkonu FVE. V ideálním stavu by bylo vhodné podle dostupné předpovědi volit stanovenou úroveň výkonu, čímž by bylo docíleno efektivního provozu. Charakteristické jsou čtyři průběhy dodávaného výkonu.

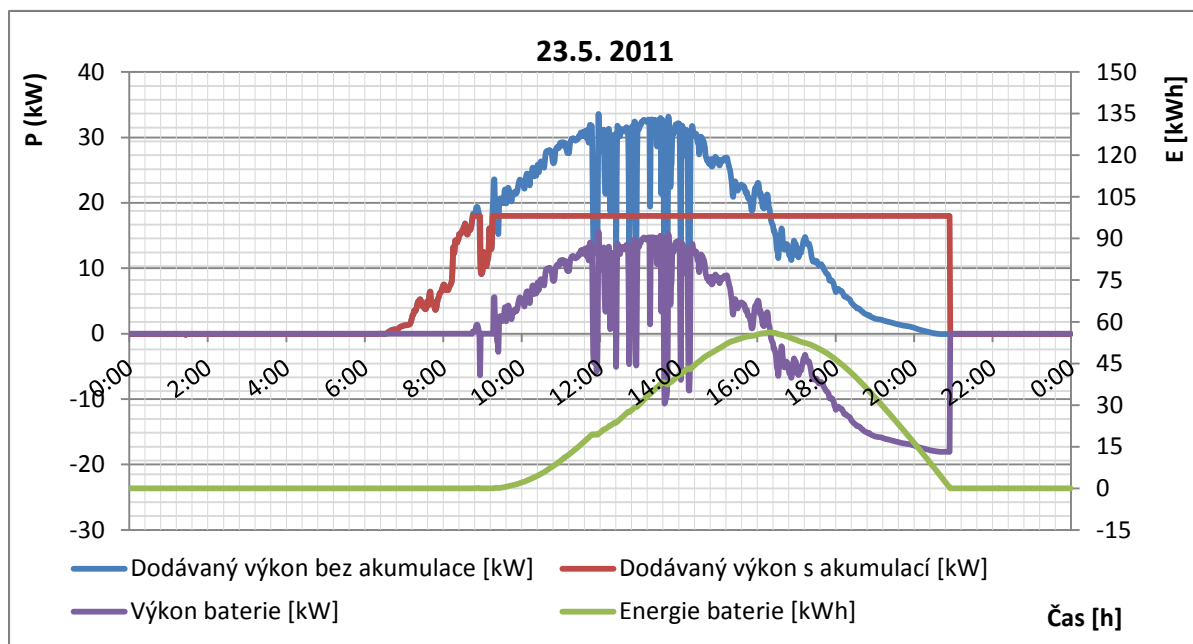
- **Absolutně slunečný den** - stav již popsán je ideální sluneční den, kdy nedochází k výkyvům výkonu téměř vůbec. Dodaná energie do sítě pro stanovené období je více jak 250 kWh.
- **Slunečný den s mírnou oblačností** – tento stav je charakteristický slunečným dnem, kdy dochází k občasnému zastínění panelů a následným propadům výkonu. Tento den je charakterizován více jak 160 kWh dodané energie.
- **Oblačný den s velkou oblačností** – zde je charakter dodávaného výkonu převážně podprůměrný a dochází k častým nárůstům výkonu. Dodaná energie je v rozmezí 100 – 160 kWh.
- **Absolutně zatažený den** – pro tento den dodaná energie FVE nepřesahuje 100 kWh. Nedochází zde k nárůstu výkonu nad 50 % jmenovité hodnoty FVE, zde již akumulace nehraje podstatnou roli, nicméně lze zde neefektivní energii akumulovat a dodat v požadovaném okamžiku.

Slunečný den s mírnou oblačností

Jako slunečný den s mírnou oblačností je volen 23. 5. 2011. Maximální dP_{15min} bez akumulace je 64,7 %, průměr dP_{15min} je 8,17 %. Jako optimální limitní úroveň dodávaného výkonu s ohledem na maximální stanovený limit akumulátoru je 59,8 kWh a hodnot uvedených v Tab. 9-9 je 18 kWh.

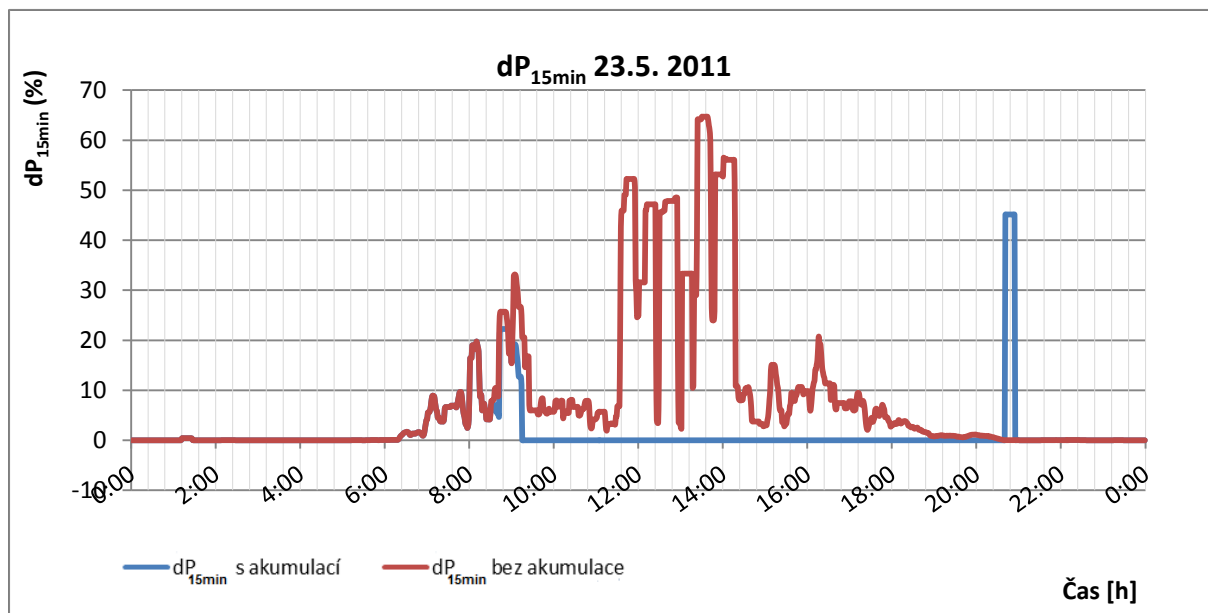
Tab. 9-9 Parametry dodávaného výkonu s akumulací pro 23. 5. 2011

Limitní dodávaný výkon	Energie akumulátoru	Maximální výkon nabíjení akumulátoru	Maximální výkon vybíjení akumulátoru	Maximální dP_{15min} s akumulací	Průměr dP_{15min} s akumulací
[kW]	[kWh]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
30,0	1,0	3,0	-22,7	56,0	7,0
28,0	2,6	5,2	-20,7	37,7	3,4
26,0	9,0	7,2	-18,7	36,9	2,4
24,0	18,9	9,2	-16,7	44,1	2,1
22,0	29,7	11,2	-18,9	48,9	1,9
20,0	42,3	13,2	-18,8	47,6	1,7
18,0	56,2	15,2	-18,1	45,2	1,5
16,0	70,5	17,2	-16,1	40,2	1,2
14,0	85,8	19,2	-14,1	18,4	0,5
12,0	103,4	21,2	-12,1	13,4	0,4
10,0	121,9	23,2	-10,1	9,7	0,4



Obr. 9-7 Simulace dodávaného výkonu FVE 40 kWp s akumulací 23. 5. 2011

Z Obr. 9-7 je patrné, že je dodrženo limit akumulátoru a zároveň je dodávka elektrické energie prodloužena až do 9:00. Zároveň si lze všimnout, že jsou eliminovány téměř všechny propady výkonu, což lépe znázorňuje Obr. 9-8.



Obr. 9-8 Změna výkonu dP_{15min} pro slunečný den s mírnou oblačností

Pro zvolenou úroveň lze konstatovat, že energie optimálního akumulátoru dle Tab. 9-9 je 56,2 kWh. Průměr dP_{15min} nepřesahuje 1,5 %.

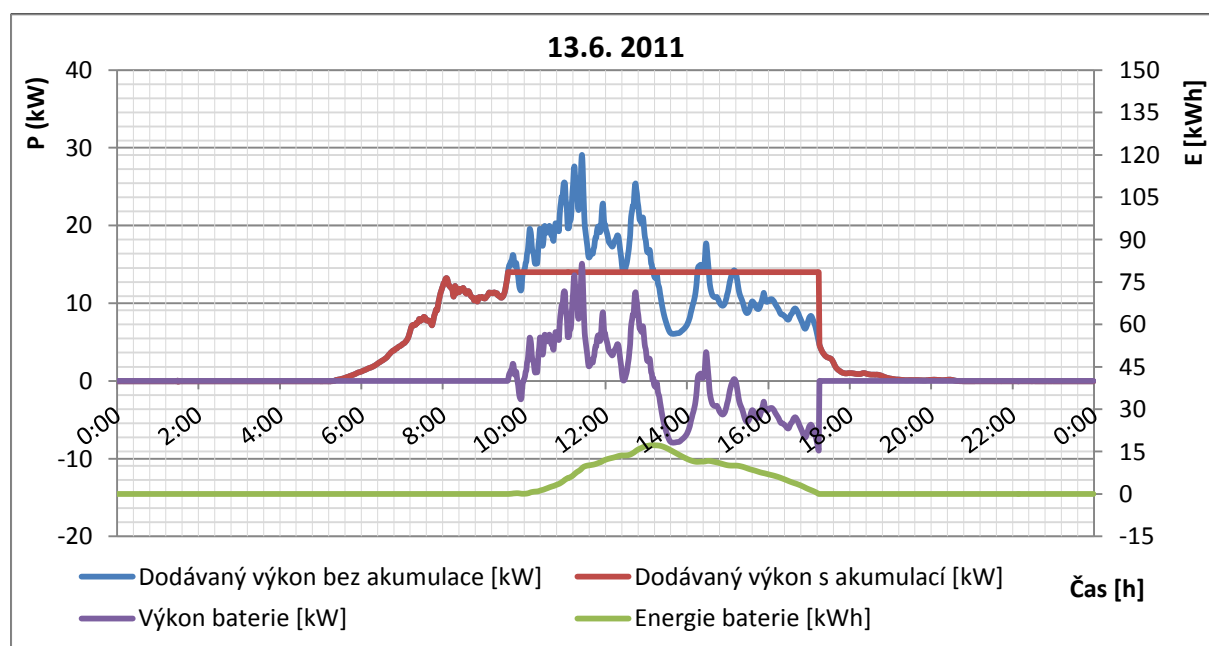
Oblačný den s velkou oblačností

Jako oblačný den s velkou oblačností je volen 13. 6. 2011. Maximální dP_{15min} bez akumulace je 33 %, průměr dP_{15min} je 3,89 %. Optimální limitní úroveň dodávaného výkonu podle hodnot uvedených v Tab. 9-10 je 14 kW.

Tab. 9-10 Parametry dodávaného výkonu s akumulací pro 13. 6. 2011

Limitní dodávaný výkon	Energie akumulátoru	Maximální výkon nabíjení akumulátoru	Maximální výkon vybíjení akumulátoru	Maximální dP_{15min} s akumulací	Průměr dP_{15min} s akumulací
[kW]	[kWh]	[kW]	[kW]	[%]	[%]
30,0	0,0	0,0	0,0	33,0	3,9
28,0	0,0	1,1	-0,4	30,3	3,8
26,0	0,1	3,1	-1,5	26,5	3,7
24,0	0,4	5,1	-6,1	24,0	3,5
22,0	1,2	7,1	-6,1	20,9	3,1
20,0	2,4	9,1	-6,0	24,4	2,6
18,0	5,4	11,1	-11,9	29,7	2,3
16,0	11,0	13,1	-9,9	12,7	1,4
14,0	17,2	15,1	-9,0	27,5	0,9
12,0	24,6	17,1	-11,2	29,1	0,7
10,0	35,1	19,1	-10,0	25,1	0,5

Z Obr 9-9 lze vidět, že hodnota energie akumulátoru i pro minimální uvažovaný limit nedosahuje stanovené maximální energie akumulátoru. Akumulace zde již v porovnání s předešlým případem nehraje tak podstatnou roli, jelikož průměr dP_{15min} bez akumulace nepřesahuje 3,9 %.



Obr. 9-9 Simulace dodávaného výkonu FVE 40 kWp s akumulací 13. 6. 2011

Jelikož se jedná o energetickou akumulaci, je potřeba říci, že je vhodné volit nižší úroveň limitního výkonu, neboť zvolený akumulátor typu Li-ion, ač disponuje poměrně velkým množstvím pracovních cyklů, ztrácí svou kapacitu, pokud jeho cyklování probíhá na pomezí vybití. Z tohoto závěru vyplývá, že je vhodné z hlediska životnosti akumulátoru udržovat nabíjecí výkon akumulátoru v kladných hodnotách a vybíjecí výkon pak v záporných hodnotách.

9.3.3 Návrh akumulačního systému z nabídky trhu

V nabídce se nachází různé provedení staničních i trakčních baterií založených na technologii Li-ion. Nejčastěji se vyskytuje varianta LiFeYPO₄, která je finančně nejdostupnější a z hlediska životnosti a bezpečnosti, jak již bylo zmíněno, nejvhodnější. V Tab. 9-11 jsou zobrazeny bateriové moduly vhodné pro spojení s FVE.

Tab. 9-11 Akumulátory LiFeYPO₄ dostupné na trhu [29]

	LiFeYPO ₄								
Napětí [V]	12	12	12	12	24	24	48	48	48
Počet článku [-]	4	4	4	4	8	8	16	16	32
Kapacita článku [Ah]	40	60	100	200	200	400	200	400	400
Energie [kWh]	0,45	0,7	1,125	2,5	5	10	10	20	40
Cena [Kč]	5990	8950	14700	25750	62135	119790	121200	26500	519150

Parametry baterie

Pro návrh akumulačního systému byl zvolen akumulátor typu LiFeYPO₄. Životnost se uvádí 2000 až 8000 cyklů, čili pro 1 cyklus za den je životnost odhadována na 15 – 20 let při poklesu kapacity na 80 %. Pro akumulační systém je vybrána baterie 24 V, 200 Ah, 5 kWh. Optimální vybíjecí proud je 0,5 C. Maximální přípustný proud je 10 C po dobu 10 s v jedné minutě. Maximální dobíjecí proud je 1 C. Maximální provozní teplota je 80 °C. [29]

Parametry akumulačního systému

Požadovaná energie akumulačního systému je 92 kWh a požadovaný výkon je 20 kW. Z těchto poznatků vyplývá výsledný akumulační systém.

- Počet baterií 19 ks
- Jmenovité napětí 456 V
- Jmenovitá kapacita 200 Ah
- Energie 95 kWh
- Optimální vybíjecí proud 0,5 C → 100 A
- Maximální vybíjecí proud 10 C → 2000 A
- Optimální výkon 47,5 kW
- Maximální výkon 190 kW
- Cena 1 180 000 Kč

10. Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce je seznámení s akumulací systémů a možnostmi jejich aplikace a využití.

V první části jsou uvedeny základní pojmy, se kterými se lze setkat ve spojení s akumulací prvky. Každý pojem je specifikován ke konkrétnímu typu akumulací systému, nicméně pojmy účinnost a životnost jsou diskutovány u všech akumulací systémů. Největší důraz této práce je kladen na elektrochemické akumulátory, které jsou rozebrány podrobněji.

Z práce je patrné, že akumulace elektrické energie představuje širokou škálu možností a principů, jak elektrickou energii uskladnit a zpětně využít. Lze pozorovat, že zdaleka nejsou všechny možnosti vyčerpány a stále se nachází nové systémy a principy umožňující elektrickou energii uskladnit. Z poznatků je patrné, že některé typy akumulátorů již ztrácí na pozornosti jako např. Ni-MH nebo Ni-Cd. Naopak jsou zde akumulátory, u kterých je rozvoj v počátcích např. Li-vzduch, VRB nebo palivové články. Zde je předpoklad širšího zastoupení.

Další část práce je založena na porovnání vlastností jednotlivých akumulátorů se záměrem určit nejvhodnější akumulátor pro fotovoltaický systém. Zde je použit software Expert Choice využívající metodu AHP ke stanovení optimální varianty. S ohledem na využití akumulátoru ve spojení s FVE je v rámci subjektivního hodnocení nejvhodnější Li-ion akumulátor typu LiFeYPO₄. Je potřeba zohlednit fakt, že se v rámci vývoje akumulátorů jedná o velmi flexibilní obor a nelze stanovisko považovat za zcela prioritní. Hlavní výhodou LiFeYPO₄ je vysoká účinnost přesahující 95 %, poměrně velký počet pracovních cyklů, které se mohou ve spojení se správným zacházením pohybovat v rozmezí 2000 – 8000 cyklů, a v neposlední řadě vysoká životnost.

V poslední části práce byl proveden návrh základních parametrů akumulací zařízení pro vybranou lokalitu s instalovanou FVE 40 kWp za účelem omezení negativních zpětných vlivů.

V prvním kroku byla stanovena míra vzniklých nežádoucích zpětných vlivů způsobených provozem FVE na základě normy ČSN 15060. Konkrétně byly sledovány kvalitativní parametry jako odchylky napájecího napětí, harmonické zkreslení napětí, dlouhodobý flickr PIt, rychlé změny napětí, frekvence a nesymetrie napětí. Kvalita sítě nevyhovuje z hlediska parametru rychlých změn napětí, kdy bylo změřeno 515 překmitů mimo dovolenou mez. Dalším nevyhovujícím parametrem je dlouhodobý flickr PIt. Tento parametr je trvale překračován.

Na základě zmíněných faktů byla provedena simulace pomocí MS Excel, kdy byl pozorován vliv akumulátoru na kvalitu dodávky elektrické energie. Z energetické akumulace vyplývá, že pokud je stanovena optimální limitní mez pro konkrétní den, zpětný vliv FVE na kvalitu dodávané energie je potlačen. Rychlé změny napětí souvisí s propady či nárůsty výkonu a v případě energetické akumulace je dodávaný výkon téměř konstantní. Čili příspěvky rychlých změn jsou eliminovány. Obdobně lze využít úvahu v rámci eliminace příspěvku dlouhodobého flickru.

Optimální akumulátor byl stanoven na základě úvahy maximální dodávky energie, čili pro absolutně slunečný den. S ohledem na zatížení sítě a respektování hloubky vybití a ztráty kapacity vlivem stárnutí byl shledán jako ideální akumulátor s možnou akumulovanou energií 92 kWh a maximálním výkonem 20 kW. Těmto parametrům vyhovuje akumulací systém sestavený z baterií LiFeYPO₄ s možnou uskladněnou energií 95 kWh a výkonem 45 kW.

Problematika akumulace energie FVE je velice rozsáhlá a náročná, proto by bylo vhodné provést podrobnější analýzu a tuto práci rozšířit v rámci diplomové práce.

Použitá literatura:

- [1] RAMÍK, Jaroslav. Vícekriteriální rozhodování: Analytický hierarchický proces (AHP). 1. vyd. KARVINÁ: MORAVIAPRESS REPRO s.r.o., 1999. 216 s. ISBN 80-7248-047-2.
- [2] SHEJBA, Jaroslav. *Realizace metody AHP v prostředí tabulkového kalkulátoru*. Pardubice, 22. 8. 2006. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. Univerzita Pardubice.
- [3] KAZDA, Jan. *Supravodivý akumulátor energie*. Plzeň, 2004. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] ŘÍHA, Stanislav. *Palivové články v osobní dopravě*. Brno, 2009. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z WWW: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16125
- [5] NI-MH BATTERIES IN PRACTICE. [online]. [2012-01-17]. Dostupné z: http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2003/fsbornik/99-CD/02-Mgr/06-Microelectronics_and_Technology/02-brz
- [6] BATTEX – baterie a akumulátory [online]. [2012-01-17]. Dostupné z WWW: <http://www.battex.cz/>
- [7] Elektrolyt [online]. [2011-012-17]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrolyt>
- [8] Skoro vše o akumulátorech a nabíjení [online]. [2012-012-17]. Dostupné z WWW: <http://www.cezeta487.ic.cz/Documents/akumulatory.pdf>
- [9] Solární akumulátor SBV 12-200 [online]. [2011-012-19]. Dostupné z WWW: <http://www.fg-forte.cz/cz/kategorie/263-solarni-akumulatory.aspx>
- [10] Mechanizmy polarizace [online]. [2012-012-25]. Dostupné z WWW: <http://dielektrika.kvalitne.cz/mechpolar.html>
- [11] Akumulátory NiFe a NiCd [online]. [2012-012-25]. Dostupné z WWW: http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/enz/Texty_folie/Texty/Akum_otevrene_NiFe_NiCd.pdf
- [12] AnOverview on Short and Long-Term Response EnergyStorageDevicesforPower Systems Applications [online]. [2012-01-12]. Dostupné z WWW: http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/technology_comparison.
- [13] Battery Separators [online]. [2012-28-1]. Dostupné z WWW: <https://nanonet.nims.go.jp/english/magazine/index.php?Vol.%204%2C%20No.%206%2C%202011-12-22%2FFocus%2026-31>
- [14] Lithium-ion battery [online]. [2012-30-1]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Li-ion>

- [15] Explaining Lithium-ion Chemistries [online]. [2012-21-2]. Dostupné z WWW: http://batteryuniversity.com/learn/article/explaining_lithium_ion_chemistries
- [16] Zinc–air battery [online]. [2012-21-2]. Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc%E2%80%93air_battery
- [17] Zinc–air batteries [online]. [2012-21-2]. Dostupné z WWW: http://www.mpoweruk.com/zinc_air.htm
- [18] Lithium–air battery [online]. [2012-23-2]. Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium%E2%80%93air_battery
- [19] Sodium-Sulfur Battery Energy Storage System Powers CNG Compression for New York Buses [online]. [2012-21-3]. Dostupné z WWW: http://www.greencarcongress.com/2006/05/sodiumsulfur_ba.html
- [20] Zebra [online]. [2012-15-3]. Dostupné z WWW: http://www.euromatic.no/ZEBRA_Aug17.pdf
- [21] Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids [online]. [23. ledna 2012]. Dostupné z WWW: http://www.iea.org/papers/2009/energy_storage.pdf
- [22] Flow batteries [online]. [2012-5-3]. Dostupné z WWW: http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/164
- [23] Superkondenzátory [online]. [2012-8-3]. Dostupné z WWW: <http://energie.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6710-superkondenzatory>
- [24] Superkapacitory [online]. [2012-12-3]. Dostupné z WWW: <http://www.jelektronik.sk/produkty-databaza/4.Pas%E2%80%93FA%E8iastky/superkapacitory%20maxwell.pdf>
- [25] Magnetic energy storage efforts in Japan [online]. [2012-10-2]. Dostupné z WWW: http://www.wtec.org/loyola/scpa/02_06.htm
- [26] An Overview on Short and Long-Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications [online]. [2012-18-3]. Dostupné z WWW: <http://powerencounter.blogspot.com/2008/10/overview-on-short-and-long-term.html>
- [27] Přecherňávací vodní elektrárny [online]. [2012-2-4]. Dostupné z WWW: http://www.tv-adams.wz.cz/vodni_precerpavaci_elektrarny.html

- [28] Průběh spotřeby ve dni maxima (3. 5. 2011) [online]. [2012-28-4]. Dostupné z WWW:
http://www.eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/mesicni_zpravy/2011/kveten/page40.htm
- [29] Trakční baterie [online]. [2012-24-4]. Dostupné z WWW:
<http://www.ostrovni-elektrarny.cz/index.php?category=tracni-baterie>